

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Ökoloogia- ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Magistritöö ökotehnoloogias

**Biogaasi transpordikütusena kasutamise
majanduslike, tehnoloogiliste ja keskkonnaaspektide analüüs**

Martin Ruul

Juhendaja: PhD Antti Roose

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2013

Sisukord

Sisukord.....	2
Lühendite loetelu.....	4
1. Sissejuhatus	5
1.1 Magistritöö eesmärk ja hüpoteesid.....	6
2. Metaankütused transpordis.....	6
2. 1 Biogaasi tootmisprotsess	6
2.2. Metaankütuste rakendamine transpordis	9
2.2.1 Energiapoliitika ja -strateegia.....	9
2.2.2 Tehnoloogia ja praktika.....	11
2.3. Biometaani keskkonna- ja sotsiaalmõju	13
3. Eesti biogaasi potentsiaal	22
4. Biogaasi biometaaniks väärindamise tehnoloogiate võrdlus	30
4.1 CO ₂ eemaldamine.....	32
4.1.1 Füüsikaline ja keemiline CO ₂ absorptsioon	32
4.1.2 Membraaneraldus	34
4.1.3 Vahelduva rõhu all adsorbeerimine.....	34
4.1.4 Krüotehnoloogia.....	35
4.1.5 Bioloogiline metaani rikastamine.....	35
4.2 H ₂ S eemaldamine	37
4.2.1 H ₂ S eemaldamine kääritamise ajal	37
4.2.2 H ₂ S eemaldamine peale kääritusprotsessi	38
4.3 Vee eemaldamine	40
4.3.1 Kondensatsiooni meetodid	41
4.3.2 Vee eemaldamine adsorptsiooni ning absorptsiooni teel.	41
4.4 Räni sisaldavate orgaaniliste ühendite (siloksaanide) eemaldamine.....	42

4.5 Hapniku/õhu eemaldamine	43
4.6 NH ₃ eemaldamine	43
4.7 Sobiva puhastustehnoloogia valimine	44
5. Biogaasi tootmise ning biometaaniks puhastamise tasuvusanalüüs kahe veisefarmi näitel	45
5.1 Metoodika ja andmed	45
5.2 Tasuvusanalüüsi tulemused.....	48
5.3 Biometaanii omahinda mõjutavate tegurite analüüs	50
Kokkuvõte	51
Tänuavaldused.....	54
Kasutatud kirjandus.....	55
Summary	61
Lisad	64
Lisa 1. Väiksema veisefarmi biometaanii omahinna arvutamisel kasutatud parameetrid. ...	64
Lisa 2. Suurema veisefarmi biometaanii omahinna arvutamisel kasutatud parameetrid.	65

Lühendite loetelu

CBG – surubiometaan (compressed biogas)

CH₄ – metaan

CNG – surumaagaas (compressed natural gas)

CO – süsinikmonooksiid ehk vingugaas

CO₂ – süsihappegaas

H₂ – vesinik

H₂S – divesiniksulfiid

KA – kuivaine

Ktoe - tuhat nafta ekvivalent tonni

kWh – kilovatt-tund

LBG - veeldatud biometaan

LNG – veeldatud maagaas

mln – miljon

MWh – megavatt-tund

NH₃ – ammoniaak

Nm³ – normaalkuupmeeter, gaasi mahu mõõtühik 0° C juures ja rõhul 1 atmosfäär

oKA – orgaaniline kuivaine, see kuivaine osa, mida mikroorganismid suudavad lagundada

t – tonn

TED – taastuvenergia direktiiv 2009/28/EÜ

VOC – lenduvorgaanilised ained, iseloomustab kõrge aururõhk toatemperatuuridel

1. Sissejuhatus

Maaailma rahvaarv on hetkel umbes 7 miljardit ja 2050. aastaks prognoositakse selle kasvu 9.2 miljardini. Kõik need inimesed vajavad oma igapäeva elus energiat, mis hetkel tuleb suures osas fossiilsetest kütustest. Neist kõige suuremas sõltuvuses on transpordisektor, kus kogu maailmas 2010. aastal tarbitud 2 200 mtoe energiast on biokütuste osakaal transpordis vaid 2% ning elektri osakaal alla 1%. Seoses rahvaarvu kasvu, elatustaseme tõusu ning elustiili muutumisega kaasneb vajadus suurema mobiilsuse järele, mille tõttu prognoositakse kõikide transpordiliikide suurenemist ning energia tarbimine transpordis võib 2050. aastaks kasvada 80% kuni 130% tänase seisuga võrreldes [1].

Fossiilseid kütuseid on piiratud koguses ja seniseid andmeid ning trende arvestades on BP oma 2011. aasta uurimistöö tulemusena pakkunud välja, et naftavarusid, mis on hetkel peamine transpordi energiaallikas, jätkub veel 46 aastaks [2]. Sellest tulenevalt otsitakse ning arendatakse alternatiive fossiilsetele kütustele. Hetke seisuga on alternatiivideks transpordis vesinikkütused, biokütused ja taastuvatest ressurssidest toodetud elekter. Ka Eesti Vabariigil on kohustus tõsta biokütuste osakaalu transpordis. Taastuvenergia direktiiviga 2009/28/EÜ on liikmesriikidele pandud kohustus miinimumeesmärgina saavutada taastuvatest energiaallikatest toodetud kütuste 10% osakaal transpordis. Selle saavutamine nõuab põhjalikku analüüsi, mis käsitleb erinevaid biokütuseid, nende toomisviise, majanduslikku tasuvust, sotsiaalset mõju ning mõju keskkonnale.

See magistritöö keskendub ühele võimalikule taastuvale energiaallikale transpordisektoris – biometaanile. Biogaasi valdkond on viimastel aastatel palju edasi arenenud ning mitmed riigid, nagu näiteks Saksamaa, Austria ja Rootsis, on biogaasi sektori arengut jõuliselt toetama hakanud [3]. Biogaasi iseenesest ei saa kasutada maagaasi asemel mootorsõidukites, sest ta sisaldab ebasoovitavaid lisaaineid ning tema energiasisaldus on liiga madal, kuid biogaasi on võimalik puhastada ning töödelda maagaasiga võrreldavale tasemele. Sellisel juhul nimetatakse seda biometaaniks ja seda võib kasutada maagaasil töötavates sõidukites.

Hetkel biogaasi Eestis biometaaniks ei puhastamise praktika puudub, kuid lähiajal kavatakse biogaasi kasutamist transpordis riiklikult toetama hakata. Selleks vajaliku taristu rajamise toetamiseks on planeeritud alates 2015. aastast 43 miljonit eurot saastekvoodi oksjonitelt saadud tuludest [4].

1.1 Magistritöö eesmärk ja hüpoteesid

Magistritöö eesmärk on aktuaalsete andmete ning teadustööde põhjal hinnata biometaan kasutamise potentsiaali transpordikütusena Eestis. Selleks tuleb analüüsida biogaasi tootmise potentsiaali, majanduslikku jätkusuutlikust ja kasutusele võtmist soodustavaid tegureid. Välja tuleb selgitada lisaks energeetilisele väljundile ka teised mõjud, mida biogaasi tootmine, puhastamine biometaaniks ning kasutamine mootorikütusena kaasa toob.

Töös püstitati järgmised hüpoteesid:

- Eesti biogaasi potentsiaal on piisavalt suur ja reaalselt rakendatav, et õigustada selle valdkonna arendamist – potentsiaali avamiseks on vajalik riiklik tugirahastamine.
- Biogaasi tootmise, puhastamise ning transpordikütusena kasutamisega kaasneb palju positiivseid üksteisega seotud majandus- ja keskkonnamõjusid.
- Biometaaniks puhastamine on majanduslikult tasuv, arvestades biogaasi puhastustehnoloogiate hinda ja efektiivsust.

Hüpoteeside tõestamiseks tuli läbi viia järgmised alluuringud:

- Biogaasi tootmise, puhastamise ning transpordikütusena kasutamise keskkonna- ning sotsiaalmõjude hindamine.
- Eesti biogaasi tootmise potentsiaali hindamine.
- Biogaasi puhastustehnoloogiate võrdlus.
- Biometaan tasuvusanalüüsi koostamine veisefarmidele.

2. Metaankütused transpordis

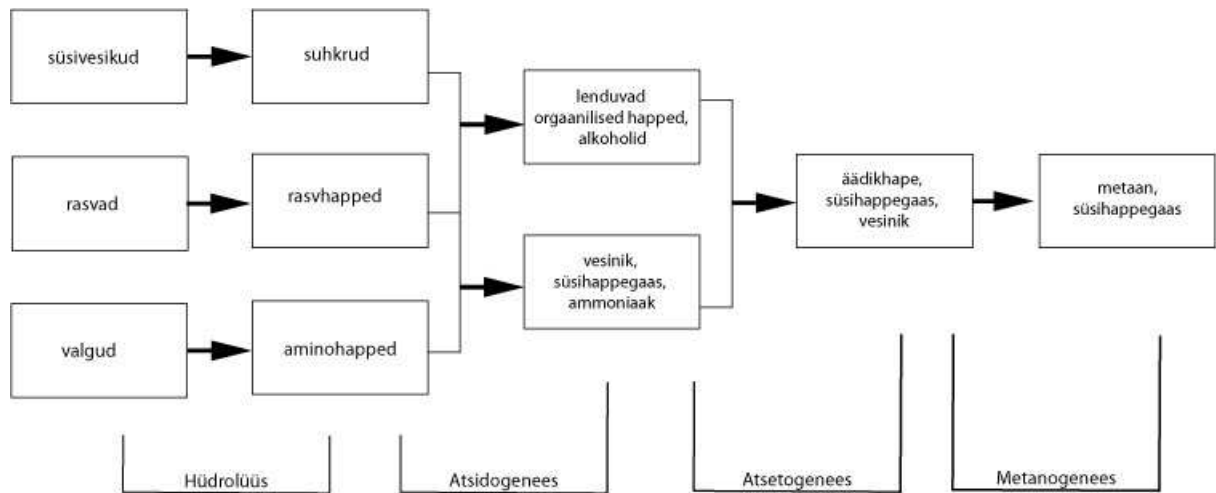
2.1 Biogaasi tootmisprotsess

Biogaasi saadakse biomassi anaeroobsel käärimisel bakterite ja arhede abil ning seda saab sarnaselt maagaasile kasutada energiaallikana. Biogaas koosneb peamiselt metaanist (CH_4 , 40-75%), süsihappegaasist (CO_2 , 20-45%) ning veeaurust (H_2O , 5-10%). Väiksemal hulgal võib biogaas sisaldada H_2 , H_2S (0,005-2%), N_2 (0-2%), NH_3 (<1%), O_2 (0-1%), CO (<0,6%), siloksaane (0-0,02%) ning lenduvaid orgaanilisi ühendeid (VOC, <0,6%) [5;6]. Inimese poolt

kontrollitud tingimustes kasutatakse mesofiilsetel tingimustel (35°C) kääritamist või termofiilsetel tingimustel (55°C) kääritamist. Mesofiilse protsessi eelisteks on stabiilsem kääritusprotsess, suurem bakterite mitmekesisus ja bakterikooslus on vastupidavam tingimuste muutustele kääritis. Termofiilset protsessi iseloomustavad kiiremini toimuvad reaktsioonid, mis lühendavad kääritusperioodi ja patogeenide vähenemine kääritusjäägis, kuid kõrgema temperatuuri hoidmine nõuab rohkem energiat ning bakterikooslus ei ole nii stabiilne, kui mesofiilse kääritusprotsessi puhul [7].

Biogaasi tekke saab jagada erinevateks etappideks [6;8]:

- Esimese sammuna muudetakse hüdroolüüsil algmaterjal (nt süsivesikud, valgud, rasvad) lihtsamateks orgaanilisteks ühenditeks (nt aminohapped, suhkrud, rasvhapped). Selles protsessis osalevad bakterid toodavad ensüüme, mis seda protsessi biokeemiliselt teostavad.
- Tekkinud vaheproduktid lagundatakse atsidogeneesiprotsessis happeid tootvate bakterite abil edasi lenduvateks orgaanilisteks hapeteks (äädik-, propioon- ja võihappeks) ja süsihappegaasiks ning vesinikuks. Samal ajal tekib ka vähesel määral alkohole ja piimhapet.
- Need tekkinud produktid lähevad atsetogeneesiprotsessi, kus bakterite abil saadakse biogaasi eelained (äädikhape, vesinik, süsihappegaas). Kuna liiga kõrge vesinikusisaldus on kahjulik äädikhapet tootvatele bakteritele, peavad äädikhapetbakterid moodustama tiheda elukeskkonna metaanibakteritega. Seda on vaja vesinikust metaani tekkeks ja sobiva elukeskkonna loomiseks happeid tootvatele bakteritele.
- Viimases etapis, metanogeneesiprotsessis, tekib atsetogeneesi produktidest metanogeensete arhede abil metaan (vt joonist 1).



Joonis 1. Metaani tekkimise protsess [8].

Kuna eri etappides vajavad bakterid oma eluprotsessiks erinevaid tingimusi, on siin vaja leida kompromiss. Et metaani tootvad arhed on kõige tundlikumad ja paljunevad aeglaselt, siis tavaliselt arvestatakse tingimuste loomisel kõige enam nendega. Vastavalt on kaheastmelistes tootmisprotsessides hüdrolüüs ja atsidogenees ruumiliselt järgnevatest etappidest eraldatud. Seeläbi saadakse sobivamad keskkonnatingimused erinevatele baktergruppidele ja parem gaasitootlikkus [8].

Keskmise tselluloosi ning ligniini sisaldava biomassi teoreetiliseks metaani saagiseks on arvatud $0,48 \text{ Nm}^3$ kilogrammi orgaanilise kuivaine kohta (oKA). [9] Eesti rohtset biomassi uurides on leitud, et oKA moodustab keskmiselt 92,7% kogu kuivaine massist (KA). [7] Praktiliselt on kätte saadav metaani hulk biomassi anaeroobsel kääritamisel kusagil 60% teoreetilisest, kuid seda % sõltub suures ulatuses kasutatavast protsessist, kääritusaja pikkusest ning bakterikoosluse eripäradest. Teoreetilisest madalamat saagikust põhjustavad lahustumatud ning raskesti lagundatavad ühendid, millest kõige suurema osakaaluga taimses biomassis on ligniin. Ligniin on keerulise struktuuriga amorfne, polüfenoolne, hargnenud makromolekul, mis on mikroorganismidele raskesti lagundatav ning seetõttu laguneb aeglasemalt kui tselluloos või hemitselluloos [10]. Tavaliselt kääritamisprotsessis ligniiniga, kui metaaniallikaga ei arvestata ja püütakse ligniini osakaal kuivaines võimalikult väiksena hoida. Rohtse biomassi puhul aitab näiteks taime varajasemas arengufaasis niitmine või ligniini vaestemate kultuuride valimine. Ligniine on võimalik ka keemiliselt lihtsamateks ühenditeks lagundada, kuid see ei ole biogaasi tootmise seisukohast majanduslikult mõistlik.

Bioloogiliselt efektiivsem ligniini lagundamine kääritusprotsessis on seega üks võimalus metaani saagikuse tõstmisel. Laboratoorsetel tingimustel on juba saavutatud häid tulemusi looduslike bakterikultuuridega, mida kasutades saavutati CH₄ tootlikus 0,15 m³ kilogrammi ligniini kohta 30 päevase kääritusperioodi jooksul [9]. Järgmiseks väljakutseks on leida optimaalsed kooslused, kus oleks vajalikul määral mikroorganisme igal metaani tekke etapil ja neile vajalike tingimuste välja selgitamine.

Biogaasi tööstusliku tootmise puhul saab substraadi jagada põllumaal kasvavaks biomassiks nagu hein, teraviljad, õlikultuurid ja tootmises tekkivaks biomassiks nagu sõnnik, reoveemuda ning orgaaniliselt lagunevad jäätmed. Saadud biogaasi kütteväärtus jääb enamasti vahemikku 5-7 kWh/Nm³. Lisaks on biogaasi võimalik saada nn. iseenesliku anaeroobse kääritamise protsessi käigus prügilatest (prügilagaas) [11].

Biogaasi on võimalik põletada puhastamata kujul soojusenergia, elektrienergia või isegi valguse saamise eesmärgil, nagu seda tehti juba 19. sajandi Inglismaal, kus tänavalaternad töötasid linna reovee biogaasil [12]. Tänapäeval on suurimaks biogaasi kasutajaks Hiina, kus arvatakse olevat umbes 30,5 miljonit lihtsat biogaasijaama, mis toodavad umbes 12,4 miljardit m³ biogaasi ja annavad gaasi üksikutele majapidamistele või küladele [13].

Teiseks võimaluseks on biogaas puhastada maagaasiga võrdsele kvaliteedile ehk biometaaniks ning siis saab seda kasutada kõikjal, kus hetkel on energiaallikaks maagaas. Eestis kehtivate normide järgi peab maagaasi metaanisaldus olema 98% (±1%), kuid riigiti on see erinev [14].

2.2. Metaankütuste rakendamine transpordis

2.2.1 Energiapoliitika ja -strateegia

Fossiilsete kütusevarude piiratus, vedelate mootorikütuste hinnatõus ning mitmed nende kasutamisest tulenevad keskkonnamõjud on sundinud ühiskonda alternatiivide otsingule. Euroopa Liit on teinud mitmeid otsustavaid samme fossiilsete kütuste kasutamise vähenemiseks ning taastuenergiaallikate osakaalu suurendamiseks. Kõige otsustavam samm selles suunas on liikmesriikidele kehtestatud taastuenergia direktiiv 2009/28/EÜ, mis sätestab kindlad eesmärgid taastuenergia kasutamisel koguenergiast ja transpordikütustest. Eesti kohustus on tagada, et aastal 2020 tarbitakse 25% energiast taastuvatest allikatest ning

10% transpordis kasutatavatest kütustest oleks taastuenergia. Tänu tuuleenergia ja biomassi kasutamisele elektritootmises, ei ole Eestil probleeme üldnõude täitmisel, kuid suhteliselt olematu on olnud areng taastuvate transpordikütuste valdkonnas. Prognoositakse, 2020 aastaks vajalik energiahulk 10% saavutamiseks on 90-100 ktoe, millest säästlikkuse kriteeriume arvestades oli 2011. aastal Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi aruande järgi täidetud <1 ktoe ehk vaid 0,2% [15]. Säästlikkuse kriteeriumi lihtsam täitmine on üks põhjusi, mis annab biometaanile eelise näiteks biodiisli või bioetanooli eest. Teemat on käsitletud täpsemalt keskkonna- ja sotsiaalmõjude peatükis. Biometaani transpordikasutuse arengutõukeks kavatakse saastekvoodi oksjonituludest 43 miljoni euroga toetada ning mille abil soovitakse saavutada umbes kolmandik vajalikust 10% [4].

Lisaks sellel tuleb märkida, et taastuenergia direktiivi järgi lähevad fossiilsete transpordikütuste kogutarbimise hindamisel arvesse bensiin ja diiselmootor, aga mitte maagaas. See tähendab, et maagaasisõidukite arvu kasv ja maagaasi osakaalu suurenemine transpordikütustes vähendaks absoluutset taastuvkütuste hulka, mis on vajalik 10% saavutamiseks [16]. Esimesed sammud selles suunas on riiklikul tasandil ka tehtud ja Maanteeamet on sõlminud lepingu 10 maagaasil töötava ning linnaliinide teenindamiseks konstrueeritud bussi ostmiseks. Plaani kohaselt võetakse need kasutusele Pärnu ja Narva linnaliinide teenindamisel 2013. aasta jooksul [17]

Maagaasi kasutamine on viimasel ajal mitmetes riikides, nagu näiteks USAs hoogustunud ja maagaas asendab järjest rohkem naftabaasil toodetud energiaallikaid. Kildagaasi kasutuselevõttuga on ka maagaasi kasutatavad varud ümber hinnatud ning avastatakse järjest uusi maardlaid [18]. Selline olukord on viinud maagaasi hinna üldisele langemisele ning ka Läänemere piirkonda planeeritav LNG terminal näitab Euroopa Liidu ja Eesti huvi maagaasisektorit ka tulevikus arendada.

Selline olukord annab võimaluse sünergia tekitamiseks, kus maagaasi transpordikütusena kasutamise soodustamine vähendab nõutavat taastuenergia absoluutkogust ja loob eeldused biogaasisectori arenemiseks, mis võimaldaks nõuetekohast biokütust ehk biometaani Eestis toota ning juba olemasolevat CNG taristut kasutades lihtsamini tarbijani viia.

2.2.2 Tehnoloogia ja praktika

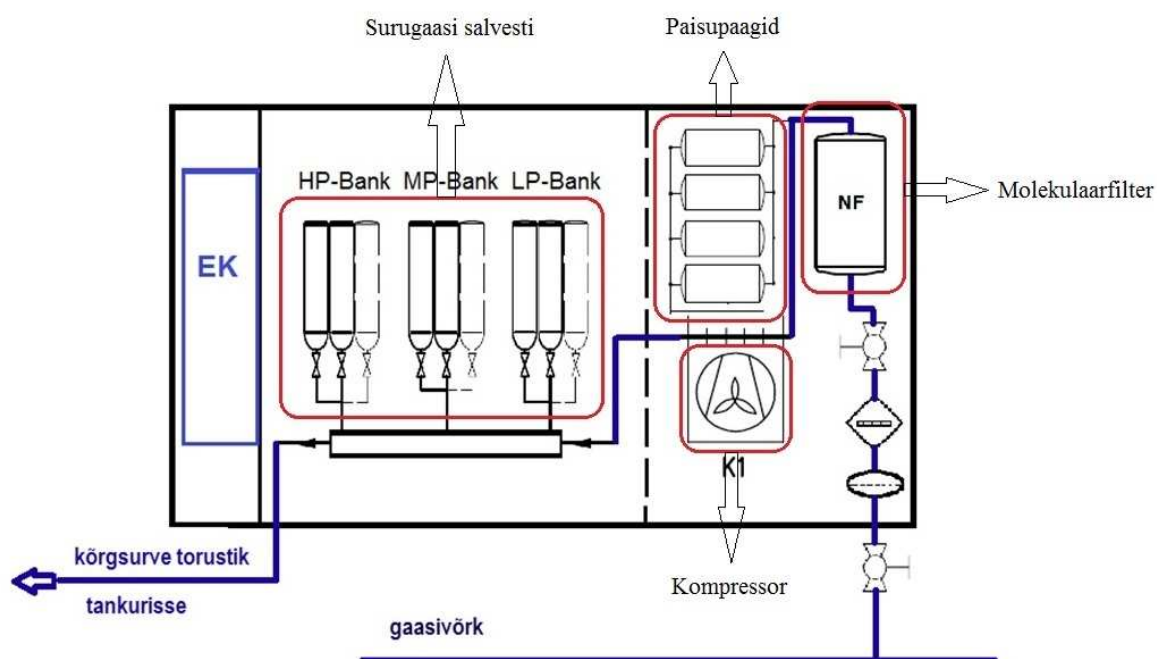
Maagaasi ja biometaanit saab väga edukalt kasutada ottomootoritega autodes, mida kutsutakse bensiinimootoriks. Kõnealune mootor ongi tehniliselt gaasimootor, mis tähendab, et see sobib biometaanile ja teistele gaasilaadsetele kütustele paremini kui vedelkütustele. Leiutaja Nikolaus Otto järgi nime saanud ottomootori algne kütus oligi gaas. Vedelkütuste kasutamine selles mootoris on isegi keerulisem, sest vaja on eriseadmeid, millega vedelkütus gaasiliseks muuta. Biometaanit oktaaniarv on isegi kõrgem kui puhtal metaanil, mis on tingitud gaasisegus vähesel määral sisalduva süsinikdioksiidi oktaanarvu tõstvast mõjust. See tähendab, et biometaanit kasutamisel saab ottomootori kompressiooniastet muuta palju suuremaks kui bensiini kasutamisel, mis tõstab kasutegurit [19].

Metaangaasi on võimalik kasutada ka diiselmootoriga sõiduautes ja raskeveokites. Gaasiseadme paigaldamisel ei pea ümber ehitama ühtegi mootori mehaanilist osa (kolbe, nukk- ja vāntvōlli), sest diiselmootor kasutab gaasi paralleelselt koos diisliga. Lūlitades gaasiseadme sisse, segatakse gaas õhuga ning segu siseneb mootorisse. Mootoris sūttib diisel õhu ja gaasiseguga samaaegselt. Valikuliselt piiratakse diisli pōõrdemomenti ning asendatakse gaasi juurdepihustamisega, mille tulemusena saavutatakse originaalne mootori pōõrdemoment. Osalise koormusega sõidul (nāiteks maanteel), tōuseb gaasi pihustamise tulemusena mootori vōimsus [20].

Metaangaasil sõitvad autod ei ole maailmas haruldane nāhtus, vaid on mitmetes riikides laialt levinud ning populaarne kūtuse liik. Nāiteks oli 2012. aasta seisuga Pakistanis umbes 3 100 000 metaangaasi sõidukit ja 3 300 metaangaasi tanklat, Iraanis 2 900 000 sõidukit ja 1 900 tanklat. Euroopas on suurima gaasil tōõtavate autode arvuga riik Itaalia, kus neid on umbes 750 000. Eesti naaberriigis Rootsis oli 2012. aasta seisuga üle 40 000 metaangaasi sõiduki ja 189 tanklat [21].

Maagaasi ja biometaanit energeetiline tihedus normaaltingimustel on vāike vōrreldes vedelkūtustega. Sōiduki mahutitesse tangitava gaasienergia hulga suurendamiseks tihendatakse gaasi rōhuni 200 bar. Siit ka mōisted surugaas (CNG- compressed natural gas), surugaasi auto, surugaasi mootor, surugaasi tankla jne. Sōiduki gaasimahutid tangitakse nominaalrōhuni 200 bar temperatuuril $+15^{\circ}\text{C}$ (nominaalrōhk – normatiivselt defineeritud maksimaalne tankimisrōhk). Nominaalrōhk on temperatuurist sõltuv suurus: kui temperatuur on alla $+15^{\circ}\text{C}$, on ka nominaalrōhk alla 200 bar ja vastupidi [22].

Eestis on hetkel neli surumaagaasi (CNG) automaattanklat. Kaks neist asuvad Tallinnas, üks Tartus ja üks Pärnus. AS Eesti Gaas arendusplaanis on surugaasitanklate rajamine Narva 2013.aastal ning vajadusel transpordiettevõtetele eritanklate rajamine [22]. Nendes jaamades on kasutusel kiire tankimise tehnoloogia, mis tehnilises mõttes tähendab tankimist tankla koosseisu kuuluvast mahutist ilma kompressori vajaduseta. Selline tankimine on ajaliselt ja mugavuselt võrdväärne vedelkütuste tankimisega. Tanklasse maagaasivõrgust sisenev maagaas, mille niiskussaste peaks oleme väiksem 50 mg/Nm^3 kuivatatakse molekulaarfiltriga tasemele alla 5 mg/Nm^3 , viiakse vastavale rõhule ning salvestatakse suures hulgas üksikutes mahutites, mis suurema efektiivse mahtuvuse saamiseks on jaotatud kolme gruppi (Joonis 2) [23].



Joonis 2. Surugaasitankla skeem [23].

Peale biometaani on läbi viidud uuringuid ka puhastamata biogaasi kasutamiseks mootorikütustena. Kasutades Toyota Prius II Hybrid CNG sõiduauto, leidis uurimisgrupp, et segades maagaasi hulka kuni 30% väärindamata biogaasi, töötas masin tõrgeteta. Siinjuures on siiski oluline kasutatava biogaasi spetsiifilised omadused ning sellest tulenevad pikaajalised mõjud mootorile. Uuringu tulemusel jõuti järeldusel, et koos innovaatiliste ning

biogaasi kasutamiseks optimeeritud mootoritega on mõeldav kasutada puhastamata biogaasi segatuna maagaasiga [24].

2.3. Biometaani keskkonna- ja sotsiaalmõju

Üheks suurimaks keskkonnaprobleemiks on hetkel globaalne soojenemine ning sellest tingitud kliimamuutused, mille üheks peamiseks põhjustajaks on üha suurenevad kasvuhoonegaaside emissioonid. Kõige suurema tähelepanu all on kasvuhoonegaasidest CO₂, mille bilanss atmosfääris suureneb kiiresti tänu fossiilsete kütuste ulatuslikule kasutamisele. Seda annab leevendada taastuvate transpordikütuste kasutusele võtuga. Üheks suure potentsiaaliga taastuvkütuseks on biogaas/biometaan, kuna erinevalt teistest biokütustest saab seda toota jäätmetest ning sel juhul ei konkureerita toidukultuuridega maa pärast [25]. Biogaasi kasutamisel vähendatakse ka metaani hulka, mis atmosfääri jõuavad. Kuna metaan on 100 aasta lõikes CO₂-st 25 korda tugevam kasvuhoonegaas, siis on keskkonna seisukohast kasulik see metaan energeetiliselt ära kasutada [26].

Biogaasi on võimalik kasutada mitmel erineval moel. Levinumad variandid on [27]:

- Biogaasi põletamine soojusenergia saamiseks
- Elektri ja soojuse koostootmine
- Biogaasi puhastamine ning väärindamine maagaasiga võrdele taseme ning selle maagaasivõrku suunamine
- Biometaani veeldamine ja balloonides transport kasutajani
- Biometaani kasutamine transpordikütusena

Üheks väljakutseks biogaasi valdkonnas ongi leida välja selgitada selle energialiigi kasutamise otstarbekus ning sobivaim kasutusviis arvestades lokaalseid ning globaalseid tingimusi. Peamised tegurid mida tuleb arvestada on:

- Kliimaatilised tingimused
- Substraadi omadused
- Primaarenergeetiline saagikus
- Kääritusjäägi kasutamise võimalused ning normid sellele
- Konkureerivate energiaallikate hinnad
- Võimalikud toetused (investeermistoetus, taastuvenergiatasu jne)

- Mõju keskkonnale
- Sotsiaalne mõju
- Turustamise tingimused
- Poliitiline keskkond
- Majanduslik jätkusuutlikus

Arvestades naaberriigi Rootsi edukat biometaanini kasutamist transpordis ning Eesti kohustust saavutada 10% taastuvenergia osakaal transpordikütustes väärriks põhjalikumal kaalumisel variant, mille puhul biogaas puhastatakse biometaaniks ning kasutatakse mootorsõidukites kütusena.

Taastuvenergia direktiivist 2009/28/EÜ tulenev kohustus saavutada taastuvatest energiaallikatest toodetud kütuste 10% osakaal transpordis tuleb täita teatud nõudeid järgides. Direktiivi artiklis 17 on täpsustatud vedelate biokütuste säästlikkuse kriteeriumid, millele vastavus on eelduseks taastuvenergiaga seotud kohustuste täitmise hindamisel. Nende kriteeriumide arvuliste väärtuste läbi on lihtne demonstreerida ja võrrelda erinevate kütuseliikide keskkonnamõju. Selleks, et biokütused direktiivis kehtestatud 10% arvutamisel arvesse läheksid, peab nende kasvuhooonegaaside emissioon võrreldes tavakütustega olema vähemalt 35% väiksem. Alates 1. jaanuarist 2017 peab emissioonide vähenemine olema vähemalt 50% ja alates 2018. aastast 60% [16].

Säästlikkuse kriteeriumile vastavuse peab tõendama taastuvkütuse tootja, kes peab tagama sõltumatu auditi läbiviimise, mis asjakohaseid standardeid kasutades kontrollib kasutatavate süsteemide täpsust, usaldusväärsust, pettuskindlust, proovivõtu tihedust ja meetodikat ning andmete stabiilsust. Kogutud informatsiooni põhjal koostab auditi läbiviija hinnangu emissioonide vähenemise määra [16].

Selleks, et vältida ebaproportsionaalset halduskoormust ja lihtsustada erinevate taastuvkütuste emissioonide hindamist, on TEDis ära toodud ka kasvuhooonegaaside emissioonide vähenemise vaikeväärtused biokütuste erinevate tootmisviiside puhul. Juhul kui biokütuse tootmisviisile on vaikeväärtus kehtestatud, võib tootja alati õigus kasutada nimetatud loetelus välja toodud biokütuste vähendamise taset (Tabel 1) ning ei pea protsessi eraldi laskma auditeerida [16].

Tabel 1. Taastuvenergia direktiivi kasvuhoonegaaside heitkoguste tüüpiliste väärtuste ning vaikeväärtuste tabel erinevate levinud biokütuste lõikes [16].

Biokütuse tootmisviis	Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemise tüüpiline väärtus	Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemise vaikeväärtus
Suhkrupeedist toodetud etanool	61 %	52 %
Nisuetanool (tootmisprotsessis kasutatav kütus täpsustamata)	32 %	16 %
Nisust toodetud etanool (tootmisel soojuse ja elektri koostootmise käitises kasutatakse kütusena ligniiti)	32 %	16 %
Nisust toodetud etanool (tootmisel tavalises põletuskatlas kasutatakse kütusena maagaasi)	45 %	34 %
Nisust toodetud etanool (tootmisel soojuse ja elektri koostootmise käitises kasutatakse kütusena maagaasi)	53 %	47 %
Nisust toodetud etanool (põhk soojuse ja elektri koostootmise käitises tootmisprotsessis kasutatava kütusena)	69 %	69 %
Ühenduses maisist toodetud etanool (tootmisel soojuse ja elektri koostootmise käitises kasutatakse kütusena maagaasi)	56 %	49 %
Suhkruroost toodetud etanool	71 %	71 %
ETBE (etüül-tert-butüüleeter) taastuvatest energiaallikatest pärit osa	On võrdne etanooli puhul kasutatud tootmisviisi omaga	
TAAE (tert-amüül-etüüleeter) taastuvatest energiaallikatest pärit osa	On võrdne etanooli puhul kasutatud tootmisviisi omaga	
Rapsiseemnetest toodetud biodiisel	45 %	38 %
Päevalilleseemnetest toodetud biodiisel	58 %	51 %
Sojaubadest toodetud biodiisel	40 %	31 %
Palmiõlist toodetud biodiisel (tootmisprotsess täpsustamata)	36 %	19 %
Palmiõlist toodetud biodiisel (tootmisprotsess metaani kogumisega õlipressimisettevõttes)	62 %	56 %

Taimse või loomse (1)õli jääkidest toodetud biodiisel	88 %	83 %
Rapsiseemnetest toodetud hüdrogeenitud taimeõli	51 %	47 %
Päevalilleseemnetest toodetud hüdrogeenitud taimeõli	65 %	62 %
Palmiõlist toodetud hüdrogeenitud taimeõli (tootmisprotsess täpsustamata)	40 %	26 %
Palmiõlist toodetud hüdrogeenitud taimeõli (tootmisprotsess metaani kogumisega õlipressimisettevõttes)	68 %	65 %
Rapsiseemnetest toodetud puhas taimeõli	58 %	57 %
Orgaanilistest olmejäätmetest toodetud biogaas, mida kasutatakse kui surumaagaasi	80 %	73 %
Märjast sõnnikust toodetud biogaas, mida kasutatakse kui surumaagaasi	84 %	81 %
Kuivast sõnnikust toodetud biogaas, mida kasutatakse kui surumaagaasi	86 %	82 %

Vaikeväärtusi arvestades ja Eesti oludele mõeldes võiks järeldada, et 2018. aastal kehtima hakkava 60% kasvuhoonegaaside heitkoguse vähenemise kriteeriumile vastaks taastuvatest transpordikütustest vaid nisust toodetud etanool (kui põhk kasutatakse ära soojuse ja elektri koostootmisjaamas), taimse või loomse õli jääkidest toodetud biodiisel ning biogaas mida toodetakse sõnnikust või orgaanilistest olmejäätmetest.

Peale nende on olemas veel tehnoloogiaid ja erinevaid toormeid, mille emissioonide vähenemise vaikeväärtus on üle 60%, millest Eesti oludes võiks teoreetiliselt transpordikütuseid toota ja mis on samuti TEDis välja toodud (Tabel 2). Siiski on nad liigitatud uute prognoositavate biokütuste alla, mida 2008. aasta seisuga turul ei leidunud või oli turul üksnes tühistes kogustes. Sellest võib järeldada, et tehnoloogiliselt ja majanduslikult ei ole nad veel konkurentsi võimelised teiste biokütustega ja 2020. aasta eesmärkide saavutamise planeerimisel ei saa nende variantidega arvestada.

Tabel 2. Taastuenergia direktiivi kasvuhoonegaaside heitkoguste tüüpiliste väärtuste ning vaikeväärtuste tabel vähe levinud biokütuste lõikes [16].

Biokütuse tootmisviis	Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemise tüüpiline väärtus	Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemise vaikeväärtus
Nisuõlgedest toodetud etanool	87 %	85 %
Puidujäätmetest toodetud etanool	80 %	74 %
Energiametsast saadud puidust toodetud etanool	76 %	70 %
Puidujäätmetest toodetud Fischer-Tropschi diisel	95 %	95 %
Energiametsast saadud puidust toodetud Fischer-Tropschi diisel	93 %	93 %
Puidujäätmetest toodetud DME (dimetüüleeter)	95 %	95 %
Energiametsast saadud puidust toodetud DME (dimetüüleeter)	92 %	92 %
Puidujäätmetest toodetud metanool	94 %	94 %
Energiametsast saadud puidust toodetud metanool	91 %	91 %

Lisaks vaikeväärtuse kasutamisele on võimalik ka konkreetsetel tingimustel toodetud biokütuse kasvuhoonegaaside vähenemise protsent määrata ka direktiivis täpsustatud metoodika alusel. Potentsiaalseks taastuvkütuste tooraineteks võiks seda võimalust arvestades pidada veel suhkruppeedist toodetud etanooli.

Taastuenergia direktiivis sätestatud juhendi kasutamine ja tõlgendamine võib aga osutuda väga keeruliseks ja segaseks nagu seda demonstreeris Soome uurimisrühm oma 2012. aasta töös [28]. Uurimisobjektiks oli neil biogaas ja selle elutsükkel ning kasvuhoonegaaside bilanss etteantud kindlas süsteemis. Kogu biometaan tootmise ahel jagati 5 etappi, milleks olid biogaasi tootmine ja kääritusjäägist vee eemaldamine, biogaasi puhastamine,

The diagram illustrates a five-stage biogas production and distribution process:

- Stage 1:** Raw material acquisition and pretreatment. This stage receives inputs of Energy and Auxiliary materials.
- Stage 2:** Biogas production. The output of Stage 1 is processed here to produce Biogas.
- Stage 3:** Water separation. Biogas is sent to Biogas upgrading (Stage 2), while the remaining liquid goes to Water separation. Water separation produces Solid residue and Reject water.
- Stage 4:** Reject water refinement. Reject water is sent here. It produces Condensation water and Nitrogen fertilizer transportation.
- Stage 5:** Refuelling station. Biogas upgrading sends Biomethane distribution to this stage.
- Wastewater treatment plant:** Condensation water is sent here.
- Field spreading:** Nitrogen fertilizer transportation is sent here.
- Recycling:** A dashed line indicates recycling from reject water refinement back to raw material acquisition and pretreatment, including Biosludge and Process water.

Kasvuhoonegaaside bilanssi väljendati seal grammides ja CO₂ ekvivalendina nagu see on sätestatud 2001. aasta IPCC poolt ja samadel alustel on emissioone arvestatud ka TEDis. Põhilisteks emissioonide allikateks oli energia tarbimine biogaasi tootmise etapis ja kääritusjäägi vedela osa rafineerimisel. Erineval TEDis sätestatud kasvuhoonegaaside heitkoguste hindamise metoodika tõlgendamisel sai moodustada 4 erinevat stsenaariumit, milles puhul varieerus hinnanguline emissioonide hulk 16,9 g CO₂/MJ kuni 47,7 g CO₂/MJ. Protsendiliselt väljendatuna varieerus kasvuhoonegaaside vähenemine 42% ja 80% vahel. Ehk siis puhtalt bürokraatlikust aspektis võib täpselt samadel tingimustel toodetud taastuv kütus kas vastata säästlikkuse kriteeriumile või sellel mitte vastata, olenevalt ühe ja sama metoodika kasutamise viisist.

18

kääritusjääk liigitada jäägi alla, siis emissioonide jagamist ei toimu ja kogu tootmisprotsessi emissioonid arvestatakse biogaasi põhjustatuks.

Teine erinevust põhjustav aspekt oli antud süsteemile spetsiifiline ega pruugi puudutada kõiki biogaasi jaamu. Antud juhul rafineeriti kääritusjäägi vedelam osa lisaenergia abil väärtuslikumaks väetiseks. Taastuvenergia direktiivi metoodika kohaselt tuleks rafineerimine lugeda süsteemi osaks, kui on otsene seos reoveepuhasti ja biogaasijaama vahel, mis tekib kui rafineerimisest ülejääv vesi kohalikku reoveepuhastisse juhtida ja selle sama reoveepuhasti jääkmuda biogaasijaamas kasutatakse. Juhul kui muda sellest reoveepuhastist ei kasutata biogaasijaamas, siis seost ei ole ja rafineerimisel tekkivaid emissioone biometaan kasvuhoonegaaside bilansis kajastama ei pea [28].

Neid tõlgendusi omavahel kombineerides saadiga tulemuseks biometaan emissioonide vähenemise määraks 42% , 66%, 68% ja 80%, mis tähendab et ühel tõlgendamise juhul ei täitnudki biometaan vajalikku vähendamise nõuet ja selliselt ei saaks seda biometaan kogust lugeda taastuvate transpordikütuste osakaalu arvestamisel.

Paljusid biogaasi toomise süsteeme hõlmav ning suurima mõjuga emissioonide bilansi arvestamisele on kääritusjäägi liigitamine. Probleeme võib tekkida näiteks olukorras, kus sõnnikut kooskääritatakse rohtse biomassiga, mis põllumajanduslikes biogaasijaamades on väga tavaline. Kuna sellise variandi kohta TEDis vaikeväärtus puudub ning puudub ka vaikeväärtus rohtse biomassis monokääritamise kohta, siis võib tekkida olukord, kus on vajalikud konkreetsete emissioonide vähenemise arvutused ning tõendamine. Selleks, et sõnniku ja rohtse biomassi kooskääritamisel toodetud biometaan vastaks TEDis kehtestatud nõuetele ning läheks arvesse taastuvkütuste osakaalu arvestuses, tuleks riiklikul tasemel Eestis defineerida kääritusjääk kaasproduktina, kuna lisaks Euroopa Liidu standarditele võib kasutada ka riiklike klassifikatsioone [16; 28].

Lisaks TEDis määratletud metoodikale on tehtud mitmeid biogaasi elutsükli hinnanguid ka teiste standardite järgi. Saksamaal Einbecki biometaanijaamas läbiviidud biometaan täieliku elutsükli analüüsis kasutati ISO standardeid 2006a ja 2006b. Neid rakendades saadi arvustuslikuks kasvuhoonegaaside emissiooniks 44,6 kg CO₂eq/MWh elektrienergia kohta, mis vähendaks kasvuhoonegaaside emissiooni 82% Saksamaa maagaasist toodetud elektriga võrreldes. Leiti, et suure mõjuga oli mineraalväetiste asemel kääritusjäägi kasutamine. Täielikult asendati K ja P väetised ja 60% ulatuses N väetised, mille tulemusena vähenes CO₂

ekvivalent kuni 32 kg CO₂/MWh võrra. Üle 80% kasvuhoonegaaside vähenemise leidsid ka prantslased oma 2011. aasta uurimistöös [24;29].

Siiski tuleb märkida, et lisaks regulatsioonidest ja meetodikatest mõjutatud tulemusele on väga tähtis ka biogaasi tootmisprotsess ja eriti biometaaniks puhastamise tehnoloogia efektiivsus. Kui meie kliimaatilisi olusid arvestamata on valitud vale biogaasi tootmise tehnoloogia ja projekt ning puhastustehnoloogia on liiga energiamahukas, siis ei ole suurt vahet, kuidas TEDi või mõne muu meetodika alusel emissioone arvutada. Tulemuseks on ikkagi see, et liigse fossiilsete transpordikütuste, soojusenergia ning elektrienergia kulu puhul ei hoia biometaani kasutamine, fossiilsete kütuste asemel, ära soovitud koguses CO₂ ekvivalendi sattumist atmosfääri.

Biometaani kasutamise ja tootmise puhul ei tuleks siiski keskenduda ainult kasvuhoonegaasidele. Peale emissioonide vähendamise ning fossiilsete väetiste asendamise võimaluse on biogaasi ning biometaani tootmisel ja kasutamisel veel keskkonnale ja ühiskonnale kasulikke mõjusid. Puhtalt esteetilisest aspektist lähtuvalt tuleb arvesse võtta, et vastupidiselt töötlemata lögale ei levita kääritusjääk ebameeldivaid lõhnasid. Rohkem inimesi mõjutab see väetamise perioodidel, mil aktiivselt veetakse läga ümberkaudsetele põldudele, kus see veel mõne päeva võib haisu levitada. Ühes intervjueeritavas farmis oli olukord tõsisem, kus lautadele suhteliselt lähedal oli kolm majapidamist, keda umbes ühe tunni jooksul päevas segas tõsiselt lögast erituv hais, kuna farmis pumbati sellel ajal veiste vedelsõnnikut esmasest lögahoidlast ümber suuremasse. Biogaasifarmi puhul, toimuks see liikumine läbi kääriti ja sellega hoitakse antud probleem ära.

Farmerid ise hindasid väga tähtsaks eeliseks seda, et anaeroobse kääritusprotsessi käigus hävivad erinevad seemned, sealhulgas umbrohu seemned [30]. Tähtis on see veisefarmide puhul, kus silo tehakse erinevatelt segakultuurilistelt rohumaadelt ja osa läga kasutatakse näiteks toidukultuuride väetamiseks või energeetiliste monokultuuride väetamiseks.

Üheks biometaani potentsiaalseks mõjuks võiks lugeda võimalust, kus suurenenud rohtse biomassi vajadus ja võimalus seda efektiivselt kasutada loob soodsad eeldused olemasolevate rohumaade kvaliteedi parandamiseks. Kõik kolm intervjueeritavat veisefarmi omanikku tunnistasid, et nende farmil on suur osakaal rohumaid, mis hetkel vajaksid maaparandust ning uute kultuuride (kas siis segakultuuride või monokultuuride) külvamist. Hinnanguliselt ja kogemuste põhjal arvestasid nad saagikuse suurenemisega 10-15 tonnilt 30-40 tonnini

märgkaalu biomassi hektari kohta (kahe niite ja kahe lägaga väetamise puhul). Seda arvesse võttes võiks eeldada, et Eesti biogaasi tootmise edendamine motiveerib ning muudab majanduslikult mõttekamaks põllumaade kvaliteedi tõstmise ja seeläbi saavutatud suurema saagikuse tõttu ei olegi vaja põllumaade eraldi kasutuselevõttu biogaasi tootmisest tingitud silo nõudluse rahuldamiseks.

Huvitavaks võimaluseks tuleb hinnata võimalust toota kääritusjäägist kontsentreeritud väetist. Selleks eraldatakse kääritusjäägi tahke ning vedel osa üksteisest. Tahket osa saab sel juhul kasutada muldade struktuursete omaduste parandamiseks ning vedelikku saab rafineerida kõrge toitainete sisaldusega vedelväetiseks. Selline lahendus on näiteks kasutusel Soomes [28]. Pole erilisi takistusi, miks sellist väetist ei võiks käsitleda maheväetisena ja seda saaks edukalt kasutada mahepõllumajanduse arendamisel.

Sotsiaalmajanduslikku kasuna võib välja tuua olukorra, kus biometaanit toodetakse maagaasivõrgust kaugel asuvas maapiirkonnas ning peamiselt kohalikuks tarbimiseks. Sellisel juhul suurendaks see kohalike elanike integreeritust kohalike või riiklike keskustega läbi odavama transpordi kulu (eeldusel, et biometaanit hind antud paigas on sarnane praeguse surugaasi hinnaga maagaasi tanklas) ja annaks võimaluse luua energiaühistuid, kus biometaanit ettevõtte osanikeks saaksid ühineda kohalikud inimesed.

Eelneva arutelu põhjal võib järeldada, et biogaasi tootmist, biometaanit puhastamist ning transpordi kütusena kasutamist tuleks käsitleda mitte ainult energiatehnoloogilise süsteemina, millel on energeetiline väljund, vaid kompleksse säästva arengu intrumendina, millel on palju erinevaid mõjusid ning nüansse:

- Energeetiline saagis
- Kasvuhoonegaaside vähenemine
- Mineraalsete väetiste asendamine kääritusjäägiga
- Lägast tingitud haisu probleemi lahendamine
- Umbrohu leviku takistamine
- Rohumaade parendamise motivatsiooni tõstmine
- Potentsiaalselt odavam alternatiiv vedelkütustele maapiirkondades

- Innovaatiline lisaväärtuse loomise võimalus

Ainult kõiki neid tegureid arvestades saab vääriliselt hinnata konkreetse biometaanijaama otstarbekust ning selle majanduslikuks toimimiseks vajalike toetusmeetmete kasutegurit.

3. Eesti biogaasi potentsiaal

Biogaasi tootmiseks sobiliku substraadi võib jagada seitsmesse suuremasse kategooriasse:

- 1) põllumajanduslikult kasvatatud energiakultuurid,
- 2) rohtne biomass kasutamata põllumaadelt,
- 3) sigade ning veiste läga ja sõnnik,
- 4) poollooduslikelt rohumaadelt niidetav biomass,
- 5) prügilates ladestatud orgaanika,
- 6) biolagunevad jäätmed,
- 7) reoveesetted ehk – muda.

Kõige suurema biogaasi tootmise potentsiaaliga neist on energiakultuuride põllumajanduslik kasvatamine. Selle potentsiaali arvutamisel on võetud aluseks 2009. aasta Soomes läbi viidud uuring [31] ning de Luna 2011. aastal kaitstud doktoritöö Eesti Maaülikoolis [7]. Soome uuringu käigus järelitati, et väetamise ning kahe lõikusega on rohtsest biomassist võimalik saada umbkaudu $2000 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ hektari koht aastas. Parimate kuultuuridena pakuti välja harilikku keraheina ja roog-aruheina, mille puhul oli biomassis sisalduva kuivaine koguseks keskmiselt 7,6 t/ha ja metaani saagiseks 320 Nm^3 kuivaine tonni kohta. Sarnase metaanisaagikuse täheldas ka Luna oma doktoritöös, kus rohusilo kuivaine tonnist saadi $296 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$. Tähtsaimaks parameetriks metaanisaagikuse hindamisel ongi biomassis kuivainesisaldus, mis siiski ei ole lineaarses sõltuvusest. Näiteks on taimede hilisemas küpsusfaasis suurem kuivainete sisaldus, kuid samal ajal on ka suurenenud nende ligniinisaldus, mis pärsib biogaasi saagikust kääritamisel [31]. Eestis oli 23.02.2010 seisuga 865 043 ha põllumaid, millele oli taotletud ühtne pindalatoetus ja seega võiksid nad teoreetiliselt olla kasutuses ning sobivad energiakultuuride kasvatamiseks [14]. Kui kasutada 5% nendest energiakultuuride kasvatamiseks, biogaasi tootmise eesmärgil, siis oleks teoreetiline metaani saagis selle anaeroobsel kääritamisel $86\,504\,300 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$ aastas.

Eestis oli 23.02.2010 seisuga 1,19 miljonit ha põllumaid, millest ühtse pindalatoetuse taotlus oli tehtud 865 043 ha. Eeldusel, et enamus järelejäänud maast on kasutusest väljas, on biogaasi toorme kasvatamiseks vaba põllupinda 324 980 ha. Võttes arvesse, et kõiki neid maid ei ole võimalik kasutusse võtta kas muutunud maakasutuse, võsastumise, omaniku huvipuuduse, raskendatud ligipääsu või mõne muu põhjuse tõttu võiks reaalselt kasutatav maa moodustada 20% kogu pindalast. Arvestatud on, et looduslike rohumaade produktsioonitase on 7,3 t/ha, mis annaks kokku 474 471 tonni rohtset biomassi. Keskmise biogaasi toodang rohtse biomassi silost on 135,5 m³/t (55% metaanisialdus). Seega oleks Eestis kasutamata põllumassiivide arvelt võimalik oletuslikult toota biogaasi kokku ligikaudu 35 359 951 Nm³ metaani [14].

TNS Emori 2011. aasta aruandele tuginedes on Eestis ligemale 362 200 siga ja 239 400 veiselooma [32]. Arvestades, et üks siga toodab ööpäevas keskmiselt 5,35 kg läga ja veiseloom 37,5 kg läga [14], toodavad Eesti sead 707 286 t ja veised 3 276 788 t sõnnikut aastas. Mario Luna 2011. aasta Eesti Maaülikooli doktoritöö järgi on sigade vedelsõnnikus 7% kuivainet, mille metaani saagikus on 252 m³/t ja veiste vedelsõnnikus 7,8% kuivainet, mille metaani saagis on 186 m³/t. Nende andmete järgi võiks sigade ja veiste lägast toodetud metaani hulk olla 60 mln Nm³. Mastaabiefekti tõttu mõistlik eeldada biogaasijaama loomist suurfarmide juurde. Eesti Statistika 2010. aasta andmete järgi on üle 300 loomaga farmides 198 270 veist ja piimalehma ning üle 1000 loomaga seafarmides 370 161 siga, kelle sõnnikust oleks võimalik toota 52 mln Nm³ CH₄.

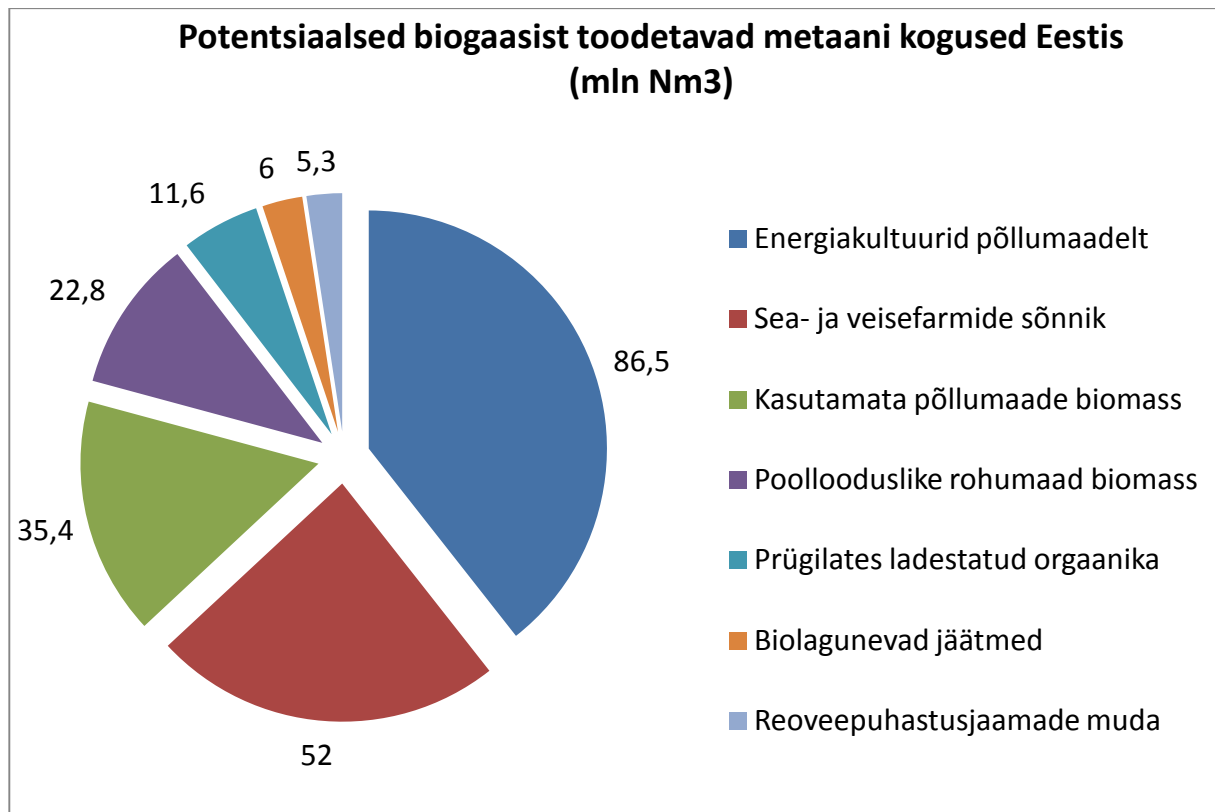
PRIA põllumassiivide registris olevate poollooduslike koosluste kogupindala on 71 409 ha. 2012 aastal taotleti hooldamise toetust 26 576 ha, millest puisniit moodustas 664 hektarit ja muud kooslused 25 912 hektarit. Niidetava heina kasutamise kohta selged nõuded puuduvad ja praegusel hetkel see ressurss kasutust ei leia. Võttes aluseks, et 50% toetustega kaetud kooslustelt võiks biomassi kogude ja ära kasutada ning hetkel toetuseta maadest võiks biogaasitoraine nõudluse kasvu juures 25% maadest tekkida huvi biomassi koguda, oleks potentsiaalne kasutatav pindala 24496 hektarit. Poollooduslike rohumaade saagikust on uuritud ja on leitud, et keskmine saagikus on vahemikus 18,5 t märgkaalus biomassi hektari kohta lamminiidul kuni 7,5 t puisniitude puhul. Siinjuures tuleb arvestada, et see oleneb suurel määral taimse biomassi liigilisest koosseisust, maa boniteedist ja lõikuse ajast. Kui arvestada keskmiseks saagikuseks 10 t hektari kohta, siis teoreetiline biomaas poollooduslikelt rohumaadelt võiks olla 244 960 tonni ja metaanisaagis 22,8 mln Nm³ [33].

Prügilatesse peab tänaste nõuete järgi rajama gaasikogumissüsteemi vähendamaks kasvuhoonegaaside sattumist atmosfääri. Kuna tegemist on metaanirikka gaasiga, siis on seda võimalik küünlas põletamise asemel paremini ära kasutada. Arvestades esialgu vaid Eesti suuremaid prügilaid, kus mastaabiefekti tõttu on kasutegur suurem, võiks teoreetiliseks kasutatava biogaasi hulgaks olla kusagil 21 mln Nm³ [34]. Prügilagaasis on keskmiselt 55% metaani [35], mis teeks metaani koguseks 11,6 mln Nm³. Prügilagaasi eriliste omaduste tõttu eelistatakse tavaliselt sooja ja elektri koostootmist. Põhjuseks on tavalise biogaasiga võrreldes suurem siloksaanide, hapniku ja halogeensete süsivesinike sisaldus, mis muudab selle puhastamise maagaasiga võrdsele tasemele keerulisemaks ja kallimaks [6].

Biolagunevate jäätmete alla kuuluvad loomsete ja taimsete kudede jäänused, destilleerimise jäägid, söökla- ja köögijäätmed, toiduõli ja rasv ning muud biolagunevad jäätmed, 2008. aastal oli võimalik Eestis toota biolagunevate jäätmete põhjal 10 mln Nm³ biogaasi ja 60% metaanisalduse puhul oleks CH₄ kogus 6 mln Nm³ [36;38].

Eesti maakondade suuremate reoveepuhastusjaamade reoveesetest anaeroobse kääritamise teel saadava biogaasi potentsiaalne kogus 2008. aasta seisuga oli 8,8 mln Nm³ ehk umbes 5,3 mln Nm³ metaani [36].

Kõigi seitsme biogaasi allika peale kokku oleks oletuslikult võimalik toota 219,6 mln Nm³ metaani, mille graafiline jaotus on toodud Joonisel 4.



Joonis 4. Teoreetiline taastuvate metaaniallikate jaotus Eestis praeguse metoodika alusel.

Esitatud lähtetingimustes metoodika alusel on hinnatud Eesti biogaasi ja biometaanipotentsiaali paljudes lõputöodes, projektides, uuringutes ja ettekannetes [14; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42]. Mõningad erinevused väljundväärtustes on tingitud hinnanguliste protsentide muutmisest ning mõningasest algandmete uuendamisest ja täpsustamisest, kuid põhimõttelisi metoodika täpsustusi ei ole tehtud. Seetõttu väärivad metoodika lähtekohad kui lähteandmestik kriitilist hindamist.

Selle magistritöö käigus intervjueriti farmiomanike, suheldi emaili teel Joel Uus'iga Põllumajanduse Registrite ja Informatsiooni Ametist, analüüsiti biogaasi tootmise ning puhastamise tehnoloogiaid ja koostati kahele veisefarmile biometaanipotentsiaali tasuvusanalüüs. Kõige selle käigus ilmnisid vastuolud kasutatavate hinnangute ja reaalse olukorra vahel. Sellest tingituna tekkis vajadus Eesti biogaasi potentsiaal kriitiliselt ümber hinnata ning pakkuda välja metoodilisi täpsustusi.

Praegu kasutuses oleva metoodika tulemustest on näha, et vähem kui kui üks viiendik biogaasipotentsiaalist tuleb prügilatest, biolagunevatest jäätmetest ning reoveepuhastite mudast. Need allikad suhteliselt väikese osakaaluga, teatud spetsiifiliste omadustega, mis

raskendavad nende kasutuselevõttu, ning nende biogaasi koguseid saab suhteliselt üheseltmõistetavalt hinnata. See on põhjus, miks järgnevalt on nende allikate hinnangulised kogused jäetud analüüsimata ja muutmata ning keskendutud on rohkem põllumajanduslike potentsiaalide hindamisele.

Alustada tuleb sellest, et biogaasi põllumajanduslikul tootmisel on mõistlik käsitleda sõnnikut ja rohtsest biomassist valmistatud silo biogaasi potentsiaali koos, mitte eraldi. Järgnevalt antakse ülevaade põhjustest, miks nende monokääritamine biogaasi tootmiseks ei ole Eesti oludes efektiivne ega majanduslikult tasuv.

Sõnnikul lisatakse rohtset biomassi (enamasti silona, mis on vajalik aastaringseks säilitamiseks), selleks et [30;43;44]:

- Suurendada biogaasi saagist ruumalaühiku/kaaluühiku kohta (tänu rohtse biomassi suuremale kuivainete sisaldusele ning C:N:P:K eelistatumale suhtele)
- Tõsta majanduslikku tasuvust
- Suurendada toitainete kontsentratsiooni kääritusjärgis ja tõsta seeläbi selle väärtust väetisena
- Vältida anaeroobse protsessi ebastabiilsust, mis on tingitud sõnniku monokääritamisel tekkivatest kõrgetest ammoniaagi kontsentratsioonidest

Rohtse biomassi monokääritamise limiteerivateks faktoriteks on heina suhteliselt väike energeetiline tihedus biogaasi saagise kontekstis. Tonnist märgkaalust silost on võimalik saada umbes 93 Nm³ metaani, mille energeetiline väärtus on kusagil 3348 MJ [7;45]. Tänu sellele sõltub majanduslik ja primaarenergeetiline kasu väga suures osas biomassi kasvukoha ning biogaasijaama vahelisest kaugusest. Lisaks sellele tuleb arvestada, et rohtse biomassi monokääritamiseks rajatud jaam vajab palju suuremat alginvesteeringut, sest erinevalt juba toimivast farmist puudub igasugune eelnev taristu, milleks on näiteks silo tegemiseks vajalikud ehitised, põllumajanduslik tehnika, kääritusjäägi mahutid (lähahoidlad), küttelehendid ning probleeme võib tekkida vajaliku tööjõu leidmisega ja kääritusjäägi piisavalt efektiivse kasutamisega. Isegi kui erinevate toetusmeetmete toel on silo tootmine farmist kaugmatel aladel majanduslikult jätkusuutlik, peab arvestama, et probleeme võib tekkida TEDis nõutud säästlikkuse kriteeriumitele vastamisel.

Spetsiifiliste tingimuste, nagu maakasutus, energia- ning keskkonnapoliitika, kliima, toetuste ja energia hindade soodsal kokkulangemisel võib tekkida olukord, kus biogaasi on

majanduslikust aspektist võimalik toota ka silo monokääritamisel, kuid Eestis sellist olukorda siiski näha ei ole, sest meie kliimat, maakasutust ja energia hindu arvestades ei oleks see ilma suurte subsideerimisteta majanduslikult tasuv.

Seepärast tuleks eeldada, et määrav osa biogaasi toodangust põllumajandussektoris tuleb sõnniku ja silo kooskääritamisel olemasolevate ning vähemalt 300 loomaga veisefarmidest ja vähemalt 1000 loomaga seafarmidest, kus on juba eelnev taristu, olulistest kogustes läga toorainena ning võimalus kasutada kääritusjääki farmi enda põllumaadel. Sellise eelduse puhul tekib küsimus, kui palju on poollooduslike rohumaid piisavalt lähedal sellistele farmidele. Intervjueeritud farmide puhul olid rohtse biomassi kasvatamiseks mõeldud põllud maksimaalselt 8 km kaugusel farmist. Võttes selle arvu orientiiriks ja arvestades, et selles raadiuses toimub suure tõenäosusega intensiivne põllumajandustegevus, on vähetõenäoline, et antud aladel asub märkimisväärsel hulgal poollooduslike rohumaid. Antud olukorras ei ole mõistlik Eesti reaalselt kasutatava biogaasi potentsiaali hindamisel arvestada poollooduslike rohumaadega senise meetodiga ja sellises mahus ehk protsendilise määraga kogupindalast, kuna see ei arvesta eeltoodud eeldusi ning kitsendusi. Palju tõesema pildi annaks vajaliku suurustega farmide kaardistamine ja poollooduslike rohumaade pindala ning tüübi hindamine ette antud raadiuse piirides farmist.

Sarnane olukord on põllumaadel kasvatatavate energiakultuuride puhul, kus eeltoodud põhjustel ei saa käsitleda sõnnikut ja silo eraldi vaid tuleks analüüsida nende koos kasutamist, mitte arvestada energiakultuuride võimalikku biogaasi saagist kasvatatuna mingil osal põllumaade kogupindalast. Sõnniku ja silo kooskääritamist ja biogaasi tootmist peaks eelkõige käsitlema sõnniku käitlemise ning väärindamise meetodina ja mitte niivõrd energiatootmise protsessina. Tasuvusuuringutes tuleb küll välja seos, et efektiivselt toodetud silo osakaalu suurendamisega protsessis kasvab ka tasuvus, kuid omad piirangud silo hulkadele seab säästlikkuse kriteerium. Kui me arvestame 2018. aasta nõudmisega, ehk 60% vähenemise klausliga, siis on selge, et mingist piirist alates kulub rohtse biomassi kasvatamisele, niitmisele, transportimisele ning töötlemisele siloks liiga palju fossiilseid kütuseid ning näiteks diiselkütuse asendamine biometaaniga ei hoia ära piisavalt suures koguses emissioone, et tagada 60% kasvuhoonegaaside vähenemine.

Veel ühe puuduse hetkel kasutuses olevas metoodikas tõid välja intervjuud veisefarmi omanikega. Nende hinnangul ei ole arvestataval hulgal kasutamata põllumaid, mida saaks kergesti kasutada näiteks silo tegemiseks ja biogaasi tootmiseks. Nimelt on ühtne

pindalatoetus loonud olukorra, kus pea kõik maad, mis asuvad farmidele piisavalt lähedal, mida saab suuri maaparandustöid tegemata ja juurdepääsuteid uuendamata põllumaana kasutada, on juba kasutusse võetud ning neid hooldatakse kas omaniku poolt või on need rendile antud.

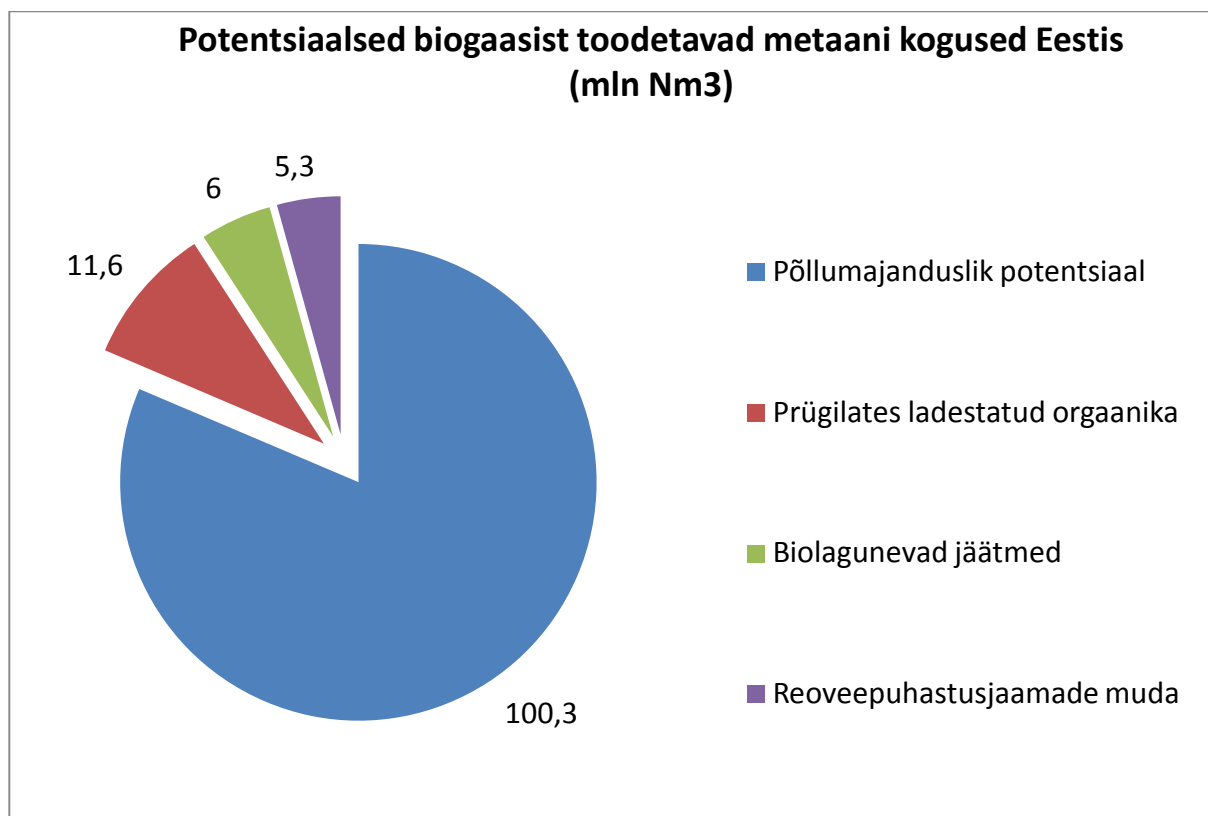
Veisefarmide puhul on veel määravaks teguriks, see et farmi omandis ja rendil olevatelt maadelt ning piisavalt lähedal asuvatelt rohumaadelt, nende praegust seisukorda arvestades, ei pruugi saada piisavalt palju silo, selleks et lisaks loomade toidule veel suures ulatuses biogaasi jaama varustada. Kahes veisefarmis, kus viidi läbi tasuvusuuring, tuleks teha silotootmise mahu olulisel suurendamisel ulatuslikke investeeringuid taristusse ja tehnikasse.

Eelnevast arutluskäigust lähtuvalt võiks Eesti biogaasi potentsiaali hinnata varasemas metoodikas piiritletud loomade arvu ja nende poole tekitatud läga kogustega, millele on lisatud teatud osakaalus rohtset biomassi. Arvestades eelpool kirjeldatud piiravaid tegureid nagu säästlikkuse kriteerium, silo konkureerimine loomasöödaga, võimalike piiranguid silo tootmismahude järsul tõstmisel (kõigi kolm intervjuueeritud farmiomanikku hindasid silo tootmise maksimaalset varu 10-15%, ilma uut tehnikat soetamata või ehitisi ehitamata), aga ka soodustavaid tegureid nagu biogaasi saagise suurenemine, protsessi stabiilsus ja kääritusjäägi toitainete kontsentratsiooni tõus, võetakse Eesti biogaasi potentsiaali hindamisel antud töös keskmiseks lisatavaks silo koguseks 15% märgkaalu läga massist. Selle 15% sees võib konkreetsest olukorrast sõltuvalt olla ka biomassi poollooduslikelt rohumaadelt ja niiõelda kasutamata põllumaadelt, mis antud kontekstis võiks tähendada maid, mida niidetakse ühtse pindalatoetuse saamiseks ning mille rohtse biomassi kasutamise osas võib jõuda osapooli rahuldava kokkuleppeni. Samuti võib see protsent ise kõikuda olenevalt konkreetsest olukorrast. Näiteks väga suurte farmide puhul, kus majandusliku tasuvuse tagab mastaabiefekt ja 15% silo saavutamiseks ei ole lähiümbruses piisavalt ressursse või piirab taristu ja tehnika sellises mahus silo tegemine, võib see protsent olla madalam, väiksemate farmide puhul võib silo osakaal olla aga suurem.

Eesti Statistika 2010. aasta andmete järgi on üle 300 loomaga farmides 198 270 veist ja piimalehma ning üle 1000 loomaga seafarmides 370 161 siga, kelle kasvatamise tõttu tekib aastas vastavalt 2 713 821 t läga ja 722 832 t läga. Neile lisanduks 15% osakaalu saavutamiseks 515 498 tonni rohtsest biomassist valmistatud silo. Kui arvestada metaanisaagiseks märgkaalu tonni kohta veise lägal 14,6 Nm³ CH₄, sea lägal 17,6 Nm³ CH₄ ja rohusilol 93 Nm³ CH₄ [7], saame Eesti põllumajanduslikult toodetud biogaasis sisalduva

metaani potentsiaaliks 100,3 mln Nm³. Ka saadud 108,5 mln Nm³ CH₄ ei pruugi olla piisavalt täpne hinnang ja hoopis täpsema tulemuse saaks biogaasi tootmiseks sobilike farmide välja selgitamine kindlaks määratud parameetrite ja tingimuste abil. Sobilikes farmides saaks teha individuaalsed uuringud ja neid tulemusi hinnates määrata ära täpne põllumajanduslik biogaasi potentsiaal. Käesolevas magistritöös selleks ressurs kahjuks puudus ja seetõttu tuli leppida teatud üldistustega.

Koos teiste, eelnevalt hinnatud allikatega kokku oleks Eesti metaani tootmise potentsiaal 123,2 mln Nm³ (Joonis 5), mis on märkimisväärselt väiksem potentsiaal, võrrelda praeguse metoodikaga alusel välja pakutud 219,6 Nm³. Peamine erinevus nende vahel tuleb, sellest et antud töös välja pakutud metoodika arvestab sõnnikust ja rohtsest biomassist tulenevat potentsiaali ühtse süsteemina ehk põllumajandusliku potentsiaalina. Praegune metoodika käsitleb aga loomade sõnniku, poollooduslike rohumaade, kasutuses olevate põllumaade ning kasutamata põllumaade potentsiaale eraldiseisvatena.



Joonis 5. Eesti biometaani potentsiaali jaotus, alternatiivset metoodikat kasutades.

Antud juhul on tehtud üldistus, et potentsiaalsest biogaasis sisalduvast metaanist toodetakse 98% metaanisisaldusega biometaan ja selle protsessi käigus on kaod 2% [6]. Sellistel tingimustel on ennustatav toodetud metaani hulk võrdne biometaani hinnangulise potentsiaaliga Eestis. Üks Nm³ biometaani energeetiline väärtus on 36,6 MJ/Nm³ ja võrdväärne ühe liitri bensiiniga, kui võrrelda gaasiseadmega bensiiniauto läbisõitu. Juba algselt gaasisõidukina ehitatud ning selleks optimeeritud auto läbib ühe Nm³ biometaaniga isegi pikema distantssi, kui samasugune bensiiniauto liitri bensiiniga [46]. Antud töös on eeldatud, et üks Nm³ biometaani võrdub 1 l bensiini.

Kui hinnangulisest 123,2 mln Nm³ biometaani potentsiaalset suudetaks reaalselt kasutusele võtta näiteks pool, siis võrduks see 53,8 ktoe energiaga, kui me arvutame selle biometaani energiasisalduse järgi või asendaks 64,7 ktoe võrra bensiini [47]. See moodustaks mõlemal juhul üle poole prognoositavast 90-100 ktoe energia kogusest, mida on Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi hinnangul vaja, et saavutada 10% taastuvkütuste osakaal transpordis 2020. aastaks [15].

4. Biogaasi biometaaniks väärindamise tehnoloogiate võrdlus

Selleks, et Eesti biogaasi potentsiaali saaks ka reaalselt mootorsõidukites ära kasutada ning sellega fossiilseid kütuseid asendada, tuleb biogaas kõigepealt väärindada. Selleks on mitmeid erinevaid tehnoloogilisi lahendusi, mida järgnevalt analüüsitakse.

Biogaasi väärindamisel on kaks peamist ülesannet:

- Puhastamise faas, mille jooksul eemaldatakse erinevad ühendid, nagu H₂S, H₂, N₂, NH₃, O₂, CO, veeaur, siloksaanid ning lenduvorgaanilised ühendeid (VOC), mis võivad kahjustada maagaasitorustikku, gaasi kasutavaid seadmeid või tarbijaid.
- Kalorsuse tõstmise faas, millega viiakse biometaan transpordis või maagaasivõrgus kehtestatud energiasisalduse normidega vastavusse. Peamiselt seisneb see CO₂ eemaldamises biogaasist ning seeläbi metaanisisalduse vajaliku tasemeni tõstmises, kuid võib endast kujutada ka näiteks propaani lisamist biometaanile, et soovitud kütteväärtust saavutada.

Eesti maagaasivõrgust pärinev maagaas on 98% ($\pm 1\%$) ja samasuguse metaani sisaldusega peab olema ka maagaasivõrku sisestatav biometaan [14]. Selline metaanisaldus tagab vajaliku kütteväärtuse ning Eestis kontekstis võime me biogaasi biometaaniks väärindamise puhul keskenduda puhastamise poolele, mille käigus viiakse biometaan maagaasiga võrdsele tasemele CO₂ ja muude lisaaainete vajalikul määral eemaldamise kaudu.

Biogaasi puhastamise meetodeid on erinevaid ja selleks, et valida välja sobivaim tehnoloogia peab arvestama biogaasi omadusi ning tehnoloogia efektiivsust, hinda ja kitsaskohti. Selleks, et vältida probleeme tootmistsükli, transpordil tarbijani ning biogaasi kasutamisel, tuleb teada ning arvestada erinevate lisaaainete poolt tekitatavate kõrvalmõjudega (Tabel 3).

Tabel 3. Biogaasis sisalduvate lisaaainete mõju [48].

Lisaaaine	Võimalik mõju
Vesi	<ul style="list-style-type: none"> Korrosioon kompressorites, gaasimahutites ja mootorites tingituna hapete tekkimisest vee ning H₂S, NH₃, CO₂ reageerimisel Vee akumulatsioon torustikes Kondensatsioon ja/või jäätumine kõrge rõhu tõttu Kalorsuse langus
Tolm	<ul style="list-style-type: none"> Kompressorite, gaasimahutite ning mootorite ummistumine
H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> Korrosioon kompressorites, gaasimahutites ja mootorites Toksilised kontsentratsioonid biogaasis ($>5 \text{ cm}^3/\text{m}^3$) Põlemisel moodustuvad SO₂ ja SO₃, mis on mürgisemad kui H₂S ja põhjustavad korrosiooni koos veega
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> Kalorsuse langus
Silokaanid	<ul style="list-style-type: none"> Põlemisel moodustuvad SiO₂ ja mikrokristalne kvarts, mis kulutavad erinevaid mootori osi
Süsivesinikud	<ul style="list-style-type: none"> Põletamisel tekitab mootorites korrosiooni
NH ₃	<ul style="list-style-type: none"> Vees lahustudes tekitab korrosiooni
O ₂ /õhk	<ul style="list-style-type: none"> Kõrgete O₂ kontsentratsioonide puhul moodustuvad plahvatusohtlikud segud
Cl ⁻	<ul style="list-style-type: none"> Põletamisel tekitab mootorites korrosiooni
F ⁻	<ul style="list-style-type: none"> Põletamisel tekitab mootorites korrosiooni

Kõige suurema osakaaluga lisaaaine biogaasis on CO₂, mille sisaldus varieerub 20-45% vahel, olenevalt konkreetsetest tingimustest ning toorainest [5]. See on põhjus, miks puhastustehnoloogia valimisel lähtutakse esmajoones CO₂ eemaldamise efektiivsusest ning puhastusastmest. Kui teatud puhastusmeetodiga on võimalik viia CO₂ soovitud tasemele, siis järgmisena planeeritakse ülejäänud lisaelementide nõuetele vastavusse viimine.

Tänapäeval enamlevinud CO₂ puhastustehnoloogiad saab jagada kategooriasse [6;48]:

- CO₂ absorptsioon vees või vesilahustes
- Vahelduvrõhu all adsorptsioon
- Membraaneraldus
- Krüotehnoloogiline CO₂ eemaldamine
- Bioloogiline meetod

Kui CO₂ puhastamiseks on tehnoloogiline lahendus paika pandud, siis järgmise etapina planeeritakse vajalikud meetmed, et saavutada biometaani vajalik puhtusaste ka teiste lisaainete puhul. Erinevate CO₂ tehnoloogiate puhul tuleb arvesse võtta, et need võivad samaaegselt puhastada ka teisi lisaaineid. Näiteks veega rõhu all puhastamisel lahustuvad vees lisaks CO₂ ka H₂S, O₂, NH₃ ja siloksaanid. Samas ei pruugi nende kontsentratsioon selle käigus väheneda soovitud tasemele ning lisameetmed on vajalikud soovitus puhastusastme tagamiseks. Selleks kasutatakse kas eelnimetatud tehnoloogiate kombineerimist või mõnda muud meetodit. Järgnevalt analüüsitakse kirjanduslike allikate põhjal levinumaid biogaasi puhastamise tehnoloogiaid ning võtteid ja pakutakse välja sobivaimad lahendused Eesti olusid arvestades.

4.1 CO₂ eemaldamine

CO₂ eemaldamisel väheneb gaasi suhteline tihedus ja energiasisaldus suureneb. CO₂ eemaldamiseks kasutatakse füüsikalist ja keemilist absorptsiooni, vahelduva rõhuga adsorptsiooni, vaakumiga adsorptsiooni, membraaneraldust, madalatel temperatuuridel eraldamist ning bioloogilist metaani rikastamist [6].

4.1.1 Füüsikaline ja keemiline CO₂ absorptsioon

Levinud füüsikaliseks meetodiks on vee kasutamine absorbendina kõrgel rõhul. Sellise juhul sisestatakse biogaas samba alumisest osast rõhul 900-2000 kPa ja vesi samba ülemisest osast, et tekiks vastassuunaline liikumine. Sambas on kohev materjal, mis annab suurema pinna vee ja gaasi kontaktiks. Samuti absorbeerub vees H₂S ja kõrge rõhu tõttu osaliselt ka metaan. Gaaside parema lahustumise saavutamiseks võidakse vett eelnevalt ka jahutada. Kasutatud

vesi tuleks normaalarõhule tagasi viia kahes etapis. Esimesel rõhulangetamise faasis langetatakse rõhk 200-400 kPa, mille tagajärjel eraldub metaanirikas gaas, milles saab uuesti süsteemi tagasi juhtida. Rõhu langetamisel tavatingimustele eraldub enamik CO₂. Selleks et vett uuesti kasutada tuleks kasutada sarnast sammas, kus veel oleks kokkupuude õhu, auru või inertgaasiga, mille tagajärjel vee CO₂ tase normaliseerub. Tavaliselt ei kasutata vett uuesti, kui vesi on vabalt kättesaadav lähedal olevast veekogust, reoveepuhastist või mõnest muust odavast allikast. Sellisel meetodi saavutatakse metaani sisalduseks kusagil 95% ja CH₄ kaod on suhteliselt väikesed (<2%) [49].

Kui vesi ei ole piisavas koguses kättesaadav või on liiga kallis, siis on võimalik vett ka uuesti kasutada. See aga nõuab lisainvesteeringut regeneratsioonisambasse ning suuremat energiakulu. Süsteemi tuleb ka sellisel juhul aegajalt puhast vett lisada, sest vee pH langeb muidu liiga madalale[50].

Gaaside lahustumine vees sõltub rõhust ning temperatuurist ja seetõttu on vajalik iga süsteemi puhul leida optimaalne vahekord rõhu, temperatuuri ning vee voolukiiruse vahel, mis antud biogaasi koostis arvestades annab soovitud puhastusastme. Näiteks suurendab vee jahutamine CO₂ lahustumist vees ning jahutamisel tekkivat soojust saab ära kasutada kääriti soojendamisel [48].

Vee asemel võib kasutada ka polüetüleenglükooli (polyethylene glycol), mida kasutavad mitmed prügilagaasijaamad USAs. Selliselt on võimalik eemaldada CO₂ ja madalate kontsentratsioonide puhul ka H₂S ning H₂O, kuna nad lahustuvad selles paremini kui metaan. Tehnoloogia on sama nagu veega absorbeerimisel, kuid polüetüleenglükooli kulub märgatavalt vähem, sest CO₂ ja H₂S lahustumine selle on parem, mis tagab väiksema energiakulu pumpamisele ning võimaldab vähendada puhastusjaama mõõtmeid. Kõrgete H₂S ning H₂O kontsentratsioonide puhul on siiski vaja nende eelnev (osaline) eemaldamine, vältimaks liiga sagedast polüetüleenglükooli regeneratsiooni etappi, mis vajab soojusenergiat [49].

Veel üheks alternatiiviks on keemiline absorptsioon amiinidega. Protsessis võib kasutada monoetüülamiini või dimetüülamiini. CO₂ lahustub sambas olevas amiinilahuses ja reageerib sellega atmosfäärirõhule lähedastes tingimustes. Selliselt on võimalik saavutada kõrge CH₄ kontsentratsioon (>95%) madalate kadude juures (<0,1%). Eelnevalt on vajalik H₂S eemaldamine vältimaks amiinide reageerimist sellega. Amiine on võimalik taaskasutada, kuid

see nõuab palju soojusenergiat, kuna protsess toimub 200° C juures. Samuti tuleb arvestada, et rikete puhul võivad mürgised amiinid inimeste tervist kahjustada [51].

4.1.2 Membraaneraldus

Membraaneraldusel on kaks erinevat tehnoloogiat, milleks on gaas-gaas süsteem ja gaas-vedelik süsteem. Membraaneralduse põhimõte seisneb sellel, et kasutatakse poolläbilaskvaid membraanseid materjale, mida oma füüsiliste mõõtmete tõttu läbivad väiksemad molekulid kergemini, kui suured. Biogaas juhitakse läbi membraani, mis laseb läbi näiteks divesiniksulfiidi ja süsihappegaasi, kuid mitte metaani. Membraanid koosnevad tavaliselt õõnsatest kokku pressitud kiududest. Protsess toimub tihtipeale kahes etapis. Ennem kui gaas siseneb kiududesse läbib see filtri, mis peab kinni vee ja õli piisad ning aerosoolid. Membraaneraldus on üks klassikalistest meetoditest prügilagaasi puhastamisel. Sellisel juhul on tegemist kuivade membraanidega [6;52].

Gaas-gaas süsteemi puhul on rõhk 2000-3600 kPa, mille puhul eraldavad membraanid metaanist CO₂, niiskuse ja madalatel kontsentratsioonides H₂S. Ühekordsel membraanide läbimisel on maksimaalne saavutatav CH₄ osakaal 92%. Viies protsessi läbi kaks või kolm korda järjest saavutatakse metaanisisalduseks 96% või rohkem. Membraani mitte läbinud gaasi hulgas võib olla 10-25% metaani ja selle saab ära põletada ning soojusenergia biogaasijaama omatarbeks kasutada või uuesti puhastusprotsessi algusesse juhtida.

Gaas-vedelik süsteemid on hiljaaegu väljatöötatud ja kasutusse võetud. Vastassuunaliselt liikuvat vedelikku ja gaasi eraldab mikropooridega membraan. Vältimaks vedeliku imbumist gaasi hulka on gaas kerge rõhu all. Biogaasi ühekordsel puhastamisel amiinlahusega sel meetodil on võimalik saada 55% metaanisisaldusega biogaasist rohkem kui 96% sisaldusega gaas. Kasutatud amiinlahust on võimalik taastoota kuumutamise ja eraldumise ning eralduvat puhast CO₂ on võimalik müüa tööstuslikuks kasutamiseks [6].

4.1.3 Vahelduva rõhu all adsorbeerimine

Tehnoloogia põhineb poorsetel materjalidel, milles kõrgendatud rõhu tingimustes selektiivselt adsorbeeruvad erinevad gaasis sisalduvad komponendid. Selleks, et eemaldada CO₂ (molekuli suurus 3,8 Å) metaanist (molekuli suurus 3,4 Å), tuleb kasutada 3,7 Å suuruste pooridega

materjali. Hilisemal rõhu langetamisel desadsorbeerub enamus materjalis kinni püütud CO₂ ja seda materjali saab uuesti kasutada. Kasutades erinevaid rõhkusid ja materjale on võimalik eemaldada ka teisi lisaained metaanist. Adsorbeerivate materjalidena on võimalik kasutada aktiivsütt, silcageli, alumiiniumoksiidi, erinevaid polümeere või zeoliiti(alumiiniumsilikaadi kristallhüdraat). Sellisel meetodil saavutatakse >97% metaanisisaldus. Siiski tuleb arvestada, et kõrgete H₂S ja siloksaanide kontsentratsioonide puhul vajalik nende eelnev biogaasist eemaldamine, sest nende puhul ei toimu aktiivne deabsorbeerumine rõhu langetamisel ja seetõttu väheneb materjali efektiivsus taaskasutamisel. Desorptsiooniprotsessi on võimalik võimendada vaakumpumpade kasutamisega [48;49].

4.1.4 Krüotehnoogia

Krüotehnoloogia põhineb gaaside erinevale veeldumise temperatuurile ja rõhule. Biogaasi kindlatele tasemetele jahutades ja kokku surudes on võimalik mittevajalikud komponendid kondensatsiooni teel eemaldada. Vedel CO₂ käitub ise lahustina, milles lahustuvad mitmed teised võimalikud biogaasi lisaained. Selleks et vältida vee külmumist seadme pindadele tuleb eelnevalt veeaur biogaasist eemaldada. Seejärel surutakse gaas 8000 kPa rõhu alla, misjärel viiakse temperatuur -45° C juurde ja kondenseerunud CO₂ eemaldatakse. Järgmise sammuna jahutatakse gaas veel 10° C võrra -55° C juurde ning lastakse seejärel gaasil laieneda 1000 kPa rõhuni, mille tulemusel langeb temperatuur -110° kraadini Celsiuse järgi. Sellistel tingimustel jääb järelejäänud CO₂ ja rohkem kui 97% metaanisisaldusega gaasi saab kokku koguda. Selline meetod on väga energiamahukas ja seetõttu pole Euroopas väga laialt levinud [6;48].

4.1.5 Bioloogiline metaani rikastamine

Uuritud on ka kemoautotroofsete mikroorganismide kasutamist metaanisisalduse tõstmiseks ja muude ainete osakaalude vähendamiseks. Sobilikud selleks on metanogeensed arhed, kes kasutavad süsinikuallikana vaid CO₂ ja energiaallikana H₂. *Methanobacterium thermoautotrophicum* kasutades on saavutatud häid tulemusi suurendamaks metaani osakaalu ja vähendamaks CO₂ ja H₂S sisaldust. Katse käigus kasutati biogaasi mille metaani sisaldus oli 50-60%, CO₂ sisaldus 30-40% ja H₂S sisaldus oli 1-2%, millele lisati veel juurde puhast H₂. Tulemuseks oli gaas milles metaani umbes 96%, CO₂, 4% ja H₂ ning H₂S gaasist ei leitud.

Selline puhastusviis on ka ainuke, mis lihtsalt ei suurenda CH₄ protsenti vaid suurendab ka selle kogust. Tööstuslikult sellist tehnoloogiat kasutusel ei ole, kuid teema väärriks täiendavaid uuringuid [6].

Tabelis 4 on kirjanduslike allikate põhjal kokku võetud erinevate CO₂ puhastusmeetodite eelised ning puudused.

Tabel 4. CO₂ puhastusmeetodite võrdlus [6;48;49;50;51;52].

Meetod	Eelised	Puudused
Absorbtsioon vees	<ul style="list-style-type: none"> • Odav kui vett ei pea taaskasutama • Ka mõned muud lisaained lahustuvad vees • Puudub vajadus kasutada kemikaalidele 	<ul style="list-style-type: none"> • Suur energiakulu puhastamisel (kõrge rõhk, madal temperatuur, vee pumpamine) • Kulukas investeering • Hoolduskulud on suured • Biometaanist tuleb hiljem veeaur eemaldada
Keemiline absorbtsioon vesilahustes (polüetüleenglükool- ja amiinlahused)	<ul style="list-style-type: none"> • Madal elektrikulu • Väiksemad kogused võrreldes puhta vee kasutamisega • Väiksed CH₄ kaod • Kõrge puhastusaste: 95-99% 	<ul style="list-style-type: none"> • Kulud kemikaalidele • Keeruline protsess • Kemikaale ei saa taaskasutada või on taaskasutus energiamahukas • Terviserisk rikete korral
Membraaneraldus	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge puhastusaste: >98% • Võimalik ka teisi lisaaineid eemaldada 	<ul style="list-style-type: none"> • Keeruline protsess • Suur sõltuvus membraanide omadustest, kvaliteedist, kättesaadavusest ning hinnast
Vahelduva rõhu all adsorbeerimine (aktiivsõega, alumiiniumoksiidiga, erinevate polümeeride või zeoliidiga)	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge puhastusaste: >97% • Ka mõned muud lisaained adsorbeeruvad 	<ul style="list-style-type: none"> • Suur energiakulu puhastamisel (kõrge rõhk) ja adsorbentide taastootmisel (temperatuur) • Mahukas investeering • Vajalik võib olla eelnev H₂S, veeauru ning siloksaanide kontsentratsiooni vähendamine
Krüotehnoloogia	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik saavutada kõrge puhastusaste: 98% 	<ul style="list-style-type: none"> • Väga suur energiakulu puhastamisel

	<ul style="list-style-type: none"> • Vaja ei ole palju lisaenergiat vedela biometaani saamiseks (LBG) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mahukas investering
Bioloogiline	<ul style="list-style-type: none"> • Odav • Ei vaja lisaaineid ega lisa energiat 	<ul style="list-style-type: none"> • Keeruline kontrollida • Kõikuv puhastustase • Tööstuslik kasutuskogemus puudub

4.2 H₂S eemaldamine

Kõrgete H₂S kontsentratsioonide puhul eemaldatakse see tavaliselt biogaasi töötlemise algstaadiumis, et vältida kahjustusi torustikele ning seadmetele. Võimalik on H₂S eemaldada kääritamise ajal või peale seda.

4.2.1 H₂S eemaldamine kääritamise ajal

H₂S saab eemaldada juba kääritusmahutis endas, kus H₂S on võimeline reageerima metalliioonidega, moodustades lahustumatu sulfiidi, või hapnikuga, moodustades väävli.

Hapniku lisamine kääritisse paneb käima protsessi millega mikroorganismid oksüdeerivad H₂S elementaarseks väävliks ($2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$). Enamasti on selle protsessi läbiviijateks autotroofsed bakterid (*Thiobacillus*), kes kasutavad süsinikuallikana biogaasis sisalduvat CO₂. Hapniku on selle protsessi toimumiseks vaja 2 – 6% ja sellega saavutatakse 80-99% H₂S puhastamise efektiivsus. Sellest võib siiski väheks jääde, et saavutada maagaasistandard ja seetõttu võib vaja minna lisameetmeid. Jälgida tuleb ka seda, et hapnikku üle ei doseeritaks, sest see võib rikkuda anaeroobsete protsesside toimumise efektiivsust ning muuta gaasisegu plahvatusohtlikuks [6].

Teiseks võimaluseks on kääritisse lisada metalliühendeid. Üheks levinuimaks on raudkloriid, mis reageerib H₂S ja moodustab FeS:





See on lihtne ja efektiivne meetod kõrgete kontsentratsioonide puhul, kuid raske on saavutada biogaasis piisavalt madal H_2S kontsentratsioon vastamaks maagaasi kvaliteedile. Parimatel juhtudel on kontsentratsioon suudetud viia $100 \text{ cm}^3/\text{m}^3$. Põhiliselt on kasutusel olukordades, kus järgnevad puhastusetapid on tundlikud või kaotavad efektiivsuses suurte H_2S kontsentratsioonide puhul. Näiteks CO_2 eemaldamise protsess polüetanoolglükooliga või membraantehnoloogiat kasutades [6].

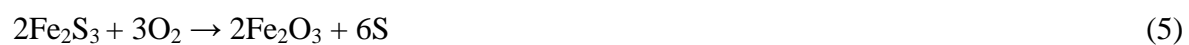
4.2.2 H_2S eemaldamine peale kääritusprotsessi

a) Adsorbeerimine erinevate metalliühenditega

Selleks võib kasutada raudoksiidi, raudhüdroksiidi, tsinkoksiidi, raudsulfiidi või tsinksulfiidi. Raudoksiidi puhul kasutatakse raualaastutega pikitud kangast, puitpelleteid või punasest rauarikkast mudast tehtud pelleteid. Raudoksiidi või raudhüdroksiidi puhul tuleb arvestada, et tegemist on endotermilise protsessiga ja vajalik on vähemalt 12°C , kuid optimaalne vahemik on $25\text{-}50^\circ \text{C}$. Protsessi võib veel aeglustada vee kondenseerumine, mis raudoksiidi osakeste kleepumise tõttu vähendab reageerimisvõimelist pinda.



Raudoksiidi saab uueti kasutada, kui moodustunud soola aereerida:



See reaktsioon on eksotermiline ja selle jooksul vabaneb suures koguses soojust, mis on ohtlik puidust pelletite kasutamise puhul, sest need võivad süttida, kui temperatuuri protsessis ei reguleerita. Tavaliselt kasutatakse kahte reaktsioonimahutit, et ühe toimimise ajal oleks võimalik teises uuesti raudoksiidi taastoota. Raudoksiidi saab siiski kasutada piiratud arv kordi, sest oksüdatsiooniprotsessis tekkiv väävel ladestub ning vähendab raudoksiidi reaktsioonipinda [6]

b) Absorbeerumine vedelikes

H₂S absorbeerumine vedelikes võib olla kas füüsikaline või keemiline protsess. Füüsikalise protsessi puhul toimub H₂S lahustumine lahustis. Keemilise protsessi puhul järgneb lahutumisele ka keemiline reaktsioon lahustuva aine ja lahusti vahel.

Kõige levinum füüsikaline meetod on vedelikega rõhu all puhastamine. Üheks võimaluseks on teha seda puhta veega, mille puhul saab ühendada CO₂ puhastamise ning H₂S puhastamise. Teine olukord on siis, kui CO₂ puhastamise tehnoloogia vajab eelnevat või järgnevat H₂S puhastamise etappi [35].

Sellisel juhul tavalise veega ei puhastata, sest energia kulu selle pumpamiseks ning jahutamiseks on liiga suur, vaid kasutatakse erinevaid absorptsiooniprotsessi soodustavaid lisaained [6]:

- NaOH - reageerib H₂S ja moodustab Na₂S või NaHS, mis sadestub ja eemaldatakse
- FeCl₂ - annab reageerides lahustumatu FeS.
- Fe(OH)₃ - reageerides moodustub Fe₂S₃.

c) Membraaneraldus

Madalamate kontsentratsioonide puhul võidakse CO₂ membraansel puhastamisel saavutada ka vajalik H₂S tase. See oleneb siiski palju konkreetsetelt kasutatavatest tehnoloogilistest lahendustest, membraanide omadustest, puhastatava biogaasi H₂S algsest sisaldusest ning soovitud lõppkontsentratsioonist [51].

Tabelis 5 on kirjanduslike allikate põhjal kokku võetud erinevate H₂S puhastusmeetodite eelised ning puudused.

Tabel 5. H₂S puhastusmeetodite võrdlus [6;35;48;51].

Meetod	Eelised	Puudused
Bioloogiline (O ₂ /õhu lisamisega)	<ul style="list-style-type: none"> • Odav investeering ja käitlemine, ei vaja erilisi seadeid ega kemikaali. • Lihtne protsess 	<ul style="list-style-type: none"> • H₂S kontsentratsioon jääb kõrgeks(100-300 cm³/m³) • Liigne O₂ põhjustab probleeme hilisemal puhastamisel • O₂ liigne doseerimine põhjustab plahvatusohtliku segu tekke
FeCl ₃ /FeCl ₂ /FeSO ₄	<ul style="list-style-type: none"> • Odav investeering (mahuti 	<ul style="list-style-type: none"> • Madal efektiivsus(100-150

(kääritis)	ning pump doseerimiseks) <ul style="list-style-type: none"> • Madal energiakulu • Lihtne protsess • H₂S ei satu kontakti torustikega • Biogaas ei sisalda liigset O₂/õhku 	cm ³ /m ³) <ul style="list-style-type: none"> • Kulud rauasoolade soetamiseks • Temperatuuri ja pH muutused ei ole kääritusprotsessile soodsad • Raske õigesti doseerida
Fe ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃ (kangas või puitpelletitel)	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge efektiivsus: >99% • Odav investeering • Lihtne protsess 	<ul style="list-style-type: none"> • Tundlik vee suhtes • Suured töötlemise kulud • Raudoksiidi või –hüdrosiidi taastootmisel on puidu süttimise oht, kuna protsess eksotermiline • Reaktsiooni pind väheneb iga tsükliga • Vabanev tolm võib olla mürgine
Absorbtsioon vees	<ul style="list-style-type: none"> • Saavutatakse madal H₂S tase (<15 cm³/m³) • Odav kui vett ei pea taaskasutama • CO₂ lahustub samuti vees 	<ul style="list-style-type: none"> • Suur energiakulu töötlemisel (kõrge rõhk, madal temperatuur, vee pumpamine) • Mahukas investeering • Hoolduskulud on suured
Keemiline absorbtsioon vesilahustes (NaOH, FeCl ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Madal elektrikulu • Väiksemad kogused võrreldes puhta vee kasutamisega • Väiksed CH₄ kaod • Kõrge puhastusaste: 95-99% 	<ul style="list-style-type: none"> • Kallis investeering • Kulud kemikaalidele • Keeruline protsess • Kemikaale ei saa taaskasutada või on taaskasutus energiamahukas
Membraaneraldus	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrge puhastusaste: >98% • Võimalik eemaldada ka CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Keeruline protsess • Suur sõltuvus membraanide kvaliteedist, kättesaadavusest ning hinnast

4.3 Vee eemaldamine

Puhastamata biogaas on tavaliselt küllastunud veega ja vee hulk sõltub temperatuurist. Näiteks 35° C juures on veesisaldus umbes 5%. Mida madalam on temperatuur seda väiksem

on veesisaldus biogaasis. Maagaasitorustike standardid sätestavad maksimaalseks vee hulgaks maagaasis 50 mg/m³ ning maagaasi või biometaani transpordikütusena kasutamisel tuleb see veelgi madalamale kontsentratsioonile viia. Näiteks Eesti CNG tanklates kuivatatakse maagaas molekulaarfiltritega tasemele 5 mg/Nm³ [23]. Selleks, et saavutada vajalik veesisaldus biogaasis või biometaanis, on võimalik kasutada erinevaid puhastusmeetodeid, millest levinumad on kondenseerunud vee mehaaniline eemaldamine või keemilised meetodid [6].

4.3.1 Kondensatsiooni meetodid

Kõige lihtsam viis üleliigse veeauru eemaldamiseks on biogaasi jahutamine. Ainult jahutamisega on siiski raske niiskuse sisaldust väga madalaks viia, sest madalamatel temperatuuridel tekitab probleeme jää tekkimine soojusvaheti pinnale. Selleks et saavutada madalamaid vee kontsentratsioone tuleb gaas enne jahutamist kokku suruda ning hiljem soovitud rõhule tagasi viia. Mida suuremat vee eemaldamise efekti soovitakse seda suuremat rõhku on vaja. Kondenseerunud veetilgad püütakse kinni ja eemaldatakse. Sellega välditakse edasistel etappidel kasutatavate seadmete ja torude korrosiooni.

Kondenseerunud vee mehaanilise eemaldamise võimalused [6]:

- Vedeliku osakesed eemaldatakse filtriga (0,5-2 nm mikrospoorid)
- Veetilgad eemaldatakse kasutades tsentrifugaaljõude
- Niiskuspüümisega, milles kondenseerumine toimub tänu gaasi laienemisest tulenevale temperatuuri langusele
- Biogaasitorustikus asuvate niiskustõksudega
-

4.3.2 Vee eemaldamine adsorptsiooni ning absorptsiooni teel.

Neid meetodeid kasutatakse tavaliselt kõrgematel rõhkudel, sest atmosfäärirõhul adsorbeerub või absorbeerum veest vaid väike hulk [6]:

- Vee adsorbeerumine ränioksiidis, alumiiniumoksiidis, aktiivsöes, magneesiumoksiidis või muudes sarnaste omadustega ainetes, mis suudavad vett siduda. Gaas viiakse rõhu alla ning juhitakse läbi adsorbeerivat ühendit sisaldava samba. Tavaliselt kasutatakse

paralleelselt mitut sammast, et ühe töötamise ajal saaks teisi kinnipüütud veest vabastada. Selleks langetatakse rõhku sambas ning soojendatakse seda.

- Vee absorbeerimine trietüleenglükooli abil. Vee sidunud trietüleenglükool tuleb uuesti kasutamiseks kuumutada 200° C juurde.
- Vee absorbeerimine hügrokoopsete soolade abil. Sool lahustub kui ta vett absorbeerib ja küllastunud soolalahus eemaldatakse. Soola uuesti kasutada ei saa ja pidevalt tuleb protsessi lisada uusi soolagraanuleid.

4.4 Räni sisaldavate orgaaniliste ühendite (siloksaanide) eemaldamine

Siloksaanid ühendid, milles on Si-O side ja räni aatomiga on seotud orgaaniline radikaal. Siloksaane kasutatakse näiteks kosmeetikas ja ravimites ning seetõttu on nad suuremaks probleemiks prügilagaasis ning olmereoveest toodetud biogaasis, kus nad võivad esineda suhteliselt suurtes kontsentratsioonides (1-400 mg/m³). Siloksaanid kahjustavad märkimisväärselt mootoreid, kuna põlemisel moodustuvad neist ränioksiidid ja moodustada mikrokristalset kvartsi, mis koguneb ja kulutab süütekambrit, süüteküünlaid, kolbe ning silindreid. Lisaks sellel võivad siloksaanid vähendada katalüsaatorite efektiivsust ja seeläbi tõsta sõidukite emissioone. Mootoritootjad on kehtestanud nõuded siloksaanide sisaldusele ja need on vahemikus 0,03 mg/m³ kuni 28 mg/m³ [49].

Siloksaanid on stabiilsed ühendid ja ei lagune ega reageeri lihtsalt. Selleks, et saavutada 95% siloksaanide eemaldamise efektiivsus on võimalik kasutada väävelhappelahust või lämmastikhappelahust temperatuuril 60° C. Nende kasutamisel võivad tekkida probleemid korrosiooniga.

Ka veega rõhu all puhastamisel eemaldub osa silokaane, kuid ainult seda puhastusmeetodit kasutades ei ole tihtipeale võimalik vajalik tase saavutada. Pilootprojekti käigus täheldati keskmiselt 16,6% siloksaanide kontsentratsiooni langust peale biogaasi veega puhastamist [49].

Tööstuslikult kasutuses olevatest tehnoloogiatest on hetkel levinuim aktiivsõega adsorbeerimine. Selle meetodi efektiivsus on üle 95% ja sütt on võimalik taaskasutada. Miinusteks on vajalik kõrge rõhk protsessi efektiivseks toimumiseks ning söe

taasaktiveerimiseks on vajalik 250° C. Protsessi mõjutab niiskus ja eelnevalt on vajalik veeauru eemaldamine biogaasist.

Huvipakkuvad variandid on ka silicagel ning alumiiniumoksiid. Näiteks silicagel puhastamisomadused on aktiivsöest paremad ning see on ka väga tõhus viis vee eemaldamiseks. Siiski tuleb eelnevalt suurem osa vett eemaldada, et siloksaanide adsorptsioon oleks piisav. Tulevikus on silicagel kasutamine biogaasi tööstuslikul puhastamisel veeaurust ja siloksaanidest huvipakkuv võimalus, kuid hetkel võib takistuseks saada nende materjalide hind [6].

4.5 Hapniku/õhu eemaldamine

Olenevalt tootmistehnoloogiast on võimalik, et hapniku või õhu juhitakse protsessi tahtlikult või satub see sinna tahtmatult. Näiteks prügilagaasi kogumisel satub biogaasi hulka ka atmosfääriõhku. Kui biogaasis on 60% metaani, siis 6-12% hapnikusisalduse juures muutub see segu plahvatusohtlikuks. Madalamatel metaani kontsentratsioonidel on plahvatusohtliku segu tekkimiseks vajalik hapniku osakaal väiksem.

Hapnikku ja lämmastikku puhastatakse biogaasist kasutades membraaneraldust või madalatel temperatuuridel ning rõhu all toimuvat adsorptsiooni. Need meetodid on aga kallid ja seetõttu on võimaluse korral kasulikum ennetada hapniku või õhu sattumist biogaasi [6]

4.6 NH₃ eemaldamine

Tööstuslikult eemaldatakse NH₃ ülejäänud gaasist pesemisel väävelhappe või lämmastikhappe lahustega. Nende lahustega opereerimine nõuab roostevabast terasest inventari ja võib osutuda kalliks väiksemate mahtude juures ja väiksema ning keskmise suurusega biogaasijaamade puhul. Lisaks sellele on võimalik biogaasi NH₃ puhastada ka aktiivsöega või mõnede CO₂ eemaldamise meetodite käigus, nagu adsorptsiooni ja absorptsiooni protsessid veega [6].

4.7 Sobiva puhastustehnoloogia valimine

Kirjanduslike allikate analüüsi põhjal on siiski raske ühte kindla puhastusmeetodit eelistada teistele. Põhjuseks on teaduskirjanduses esitatud andmete üldisus ning erinevate puhastusmeetodite kombineerimine praktikas. Isegi kui teoreetiliselt on protsessi ennast kirjeldatud väga detailselt, ei ole sama täpseid andmeid reaalses elus kasutatavate ning müüdavate puhastustehnoloogiate või nende kombinatsioonide kohta. Põhjuseks võib olla see, et iga konkreetne puhastussüsteem on kordumatu ja sõltub paljudest teguritest nagu konkreetne ehitusprojekt, sellest sõltuv puhastustehnoloogiate kasutamise viis ja nende kombineerimine, kliima, biogaasi spetsiifilised omadused ja tootmiskaht, soovitud puhastusaste ja biometaanide edastamine kasutamine. Lisaks sellele tuleb arvestada ärihuvidega, mille tõttu ei taheta väga täpselt tehnilisi ning majanduslikke andmeid avaldada või on turunduslikel eesmärkidel tõlgendatud tehnoloogiat positiivsemas võtmes.

Siiski võiks Eesti oludes esile tuua mõningad eelised veega puhastamisel:

- Puhastamine muutub odavamaks, kui selleks kasutatavat vett ei pea taaskasutama ja seetõttu oma teatud eelist kohtades, kus vesi on vabalt kättesaadav ja hiljem näiteks veekogusse või reoveepuhastisse juhitav.
- Lahustumise suurendamiseks vajalik vee jahutamine ei ole Eesti kliimat arvestades eriti suure energia kuluga.
- Lisaks CO₂ eemaldatakse biogaasist edukalt ka H₂S ja väiksemal määral ka teisi lisaained.
- Vaja ei ole erinevaid keemilisi ühendeid.

Veel võiks eelisjärjekorras kaaluda membraantehnoloogia kasutamist, mis on viimastel aastatel jõudsalt arenenud ning ka majanduslikult atraktiivsemaks muutunud tänu membraanmaterjalide täiustumisele [51;52].

Nende kahe puhastustehnoloogia kasutamisel on biometaanide puhastamise hinnanguline maksumus 0,1€-0,2€ Nm³ [48; 50; 51; 52].

Reaalses biogaasijaama planeerimise olukorras on siiski väga tähtis omavahel võrrelda erinevate firmade poolt konkreetse projekti jaoks pakutud puhastustehnoloogilisi lahendusi, mis võivad põhimõtete ning tasuvuse poolest erineda teaduslikus kirjanduses avaldatud hinnangutest.

5. Biogaasi tootmise ning biometaaniks puhastamise tasuvusanalüüs kahe veisefarmi näitel

Tasuvusarvutuste planeerimisel sai selgeks, et kuna tänasel hetkel Eestis biometaani tootmist ning müümist ei toimu, siis ei saa adekvaatselt hinnata võimalikku biometaani müügihinda ja teha selle järgi klassikaline tasuvusarvutus. Lahenduseks on biometaani ja surubiometaani omahinna väljaarvutamine, mida siis on lihtne võrrelda näiteks maagaasi hinnaga või maagaasitanklas müüdava surugaasi hinnaga. Kuna surubiometaan on transpordikütus, siis saab teda võrrelda ka hetkel levinumate vedelkütustega olukorras, kus läheduses CNG tanklat pole.

5.1 Metoodika ja andmed

Uurimisalusteks farmideks on kaks Eesti mõistes keskmise suurusega veisefarmi [53], suurusega umbes 700 veist (edaspidi viidatud kui väiksem farm) ja 1000 veist (edaspidi suurem farm), kes keskenduvad piima tootmisele. 700 veisega farmis oli kokku kogutav aastane läga hulk 11 000t ja suuremas farmis 20 000t. Biometaani omahinna välja selgitamiseks käidi mõlemas farmis kohapeal, intervjuueriti omanikke ning koguti analüüsiks vajalikku andmestikku. Kuna mõned arvutusteks vajalikud andmed on äriselt delikaatset laadi, siis soovisid mõlemad omanikud, et nende farme käsitletakse antud magistritöös anonüümselt ja seda soovi on austatud.

Omahinna arvustel lähtuti loogikast, et finantseerimisalliaks on täismahus laen, mille lihtintress on 6%. Selle laenu tagasimaksmise ajaks koos intressiga on arvestatud 10 aastat. Kõiki hindu on käsitletud ilma käibemaksuta. Biogaasijaama investeeringu maksumuse ning biogaasi biometaaniks puhastamise maksumuse hindamisel on kasutatud võimalikult kaasaegseid kirjanduslikke allikaid [50;52;54;55]. Biogaasijaama maksumust hinnatakse kõige levinumalt tooraine tonni põhiselt või kääriti mahu järgi ning saadud investeering tuuakse eraldi tasuvusarvutuses välja. Konkreetsetes arvutustes on kasutatud kääriti m^3 põhist investeeringu hinnangut ning biogaasijaama maksumuse arvutamisel on arvestatud investeeringukuluga $400\text{€}/\text{m}^3$ kääriti kohta [54]. Suurema biogaasijaama puhul on mastaabiefektist tingitud ehitushinna languseks arvestatud 10%. Biometaaniks puhastamise puhul ei eristata investeeringu suurust ja selle kulu ning muid jooksvaid kulusid nagu

remondi- ja hoolduskulud, kulud energiale, kemikaalidele ja tööjõule. See kõik ühendatakse kuupmeetri biometaani puhastamise hinnas.

Erinevates allikates väljatoodud puhastamise hinnad varieeruvad küllaltki suures ulatuses ka sama tehnoloogia puhul. Põhjuseks võib olla see, et väga palju sõltub konkreetsest projektis ning ettevõttest, kes puhastustehnoloogiat tarnib. Ka sama puhastustehnoloogia tüüpi kasutades on siiski erinevused konkreetsete süsteemide tehnoloogilistes lahendustes, energia efektiivsuses, hoolduskuludes, tööjõu vajaduses ning metaani kadudes. Kõigele eelnevale lisaks võib investeeringu hind kõikuda isegi sama tehnoloogiat tarniva ettevõtte puhul, sest iga kliendiga toimuvad personaalsed läbirääkimised ehitusmaksumuse osas. Sellest lähtuvalt on raske välja tuua kindlat kirjanduslikku allikat ja numbrit mille alusel tasuvusarvutusi teha. Antud töös on mitmete allikate võrdlemise tulemusena valitud puhastamise hinnaks $0,2\text{€}/\text{m}^3$ biometaani kohta, mis on natuke üle keskmise hind, kuid seda tingib ka veisefarmide ning eeldatavate biogaasi saagiste väiksus, mille puhul ei ole mastaabiefekti toetavat mõju. Võrdluse mõttes on töös arvutatud ka biometaani omahinna muutus $0,1\text{€}/\text{m}^3$ puhastamise maksumuse juures. Metaani kadudeks puhastamisel on arvestatud 2% [6].

Mõlema farmi puhul on võetud eelduseks, et nad asuvad maagaasitrassi läheduses ning sisestavad oma biometaani maagaasitrassi. See eeldus on vajalik, et farmid oleksid omavahel paremini võrreldavad. Tegelikult üks farmidest ei asunud maagaasitrassi läheduses ning muude tarbimis- ning turustamismeetodite arvestamine oleks olnud liiga keeruline ja ajamahukas antud magistritöö raames.

Mõlema farmi puhul on liitumise kuluks maagaasivõrguga arvestatud 15 000€, mis on väga subjektiivne hinnang, kuna ka Eesti Gaasi esindaja ei osanud täpsemat hinda välja pakkuda, kuna Eestis selline kogemus puudub.

Elektrikuluks on arvestatud 5 kWh tonni märgkaalu substraadi kohta [54]. Soojusenergia vajadus on arvutatud 2009. aastal eesti keelde tõlgitud Biogaasi tootmise ja kasutamise käsiraamatus välja toodud metoodika alusel [30] ja kääriti temperatuuriks arvestati 35°C , mis on tavaline temperatuur mesofiilsel anaeroobsel kääritamisel [56]. Biogaasi jaama ehitamise tõttu kasvav vajalik soojusenergia hulk tingib mõlema farmi puhul küttesüsteemide uuendamise vajaduse. Taastuvenergia direktiivis sätestatud säästlikkuse kriteeriumi tõttu ning lihtsalt keskkonnateadlikust mõtteviisist lähtuvalt tuleks välistada fossiilsetel kütustel baseeruvad küttesüsteemid. Antud juhul on arvestatud, et mõlemas farmis oleks soojusenergia allikaks puitpelletid. Pelleti tonni hinna $170\text{€}/\text{t}$ juures, kütteväärtusel $4,85\text{ MWh}/\text{t}$ ja katla 90%

kasuteguri puhul oleks soojusenergia hinnaks 31€/tilma käibemaksuta. Soojuse hinna sisse ei arvestata katla maksumust, sest sama süsteemiga hakataks köetama ka farmi ning investeering tuleks jaotada nende biogaasijaama ning farmi vahel. Samuti on suuremate süsteemide puhul on pelletkatelde kasutegur üle 90% , mis võiks kompenseerida katlale tehtud kulutused [57].

Metaanisaagise hindamisel võeti aluseks Saksamaal läbiviidud uuring biogaasijaamades, kus toimus silo ja veisesõnniku kooskäritamine [58]. Uuringu käigus koguti andmeid 45 biogaasijaamast 12 kuu vältel. Saadud tulemuste põhjal koostati mudel, mis arvestab metaanisaagise muutumist sõltuvalt silo ja sõnniku orgaanilise kuivaine suhtele ning kääritusperioodile. Kääritusajaks on käesolevas töös valitud 45 päeva, mis tavaline pikkus läga ja silo kooskäritamise puhul [56]. Orgaanilise kuivainesisalduse määramiseks on kasutatud Luna del Risco 2011. aasta doktoritöö tulemusi [7].

Silo koguste paika panemisel lähtuti Eesti biogaasi potentsiaali hindamisel välja pakutud 15% ja konkreetsetest võimalustest silo tootmist suurendada farmides. Väiksemas farmis tehti silo rullidesse ning ei olnud takistusi suurendamiseks silo tootmist ka biogaasijaama tarbeks. Seda arvestades võeti silo koguseks 2200t, mis teeks silo koguseks umbes 20% läga märgmassist. Suurema farmi puhul võeti aluseks 15%, mis teeb silo lisanõudluseks 3000t/a. Suuremas farmis valmistati silo mahutites, mis hetkel ei oleks võimaldanud mahu mõttes vajalikku 3000 t silo lisaks toota. Küll aga oli juba planeeritud silohoidlate rekonstrueerimine ja laiendamine seoses keskkonnanõuete täitmise vajadusega. Peale seda oleks võimalik ka toota 3000 tonni lisa silo biogaasijaama tarbeks. Selle tõttu ei arvestatud silo tootmiseks vajalikud investeeringud biogaasijaama osana vaid farmi enda investeeringuna. Silo maksumuseks hindas väiksema farmi omanik 35€ tonni kohta ja suurema farmi omanik 25€ tonni kohta, mis märkimisväärne vahe. See illustreerib hästi olukorda, kus sarnastes oludes toodetava biogaasi omahind varieerub tänu sisendite hinna suurele vahele.

Remondi ja hoolduskuludeks on arvestatud 2.5% investeeringu maksumusest [30;54].Tööjõu hulgaks arvestati väiksema jaama puhul 730 tundi (kaks tundi päevas) ja suurema jaama puhul 1095 tundi (kolm tundi päevas) [30]. Mõlema ettevõtte juhid hindasid palgakuluks 5€ tunni kohta.

5.2 Tasuvusanalüüsi tulemused

Kasutades eelnevalt välja toodud metoodikat, kirjanduslike andmeid ning konkreetsete veisefarmide omanike käest saadud andmeid on Microsoft Office Excel 2007 programmi kasutades arvatud kummagi farmi puhul biometaani ning surubiometaani omahind, täpsemalt on arvutustes kasutatud parameetrid välja toodud Lisas 1.

Tabel 6. Biometaani ning surubiometaani omahind väiksema veisefarmi puhul.

Läga 11 000t, silo 2 000t	Väärtus	Ühik
Biogaasijaama maksumus	707 109	€
Võrguühendus	15 000	
Silo tegemise tehnika ja ehitised	0	€
Investeering kokku	722 109	€
Elekter	9 360	€
Soojus	22 579	€
Silo	70 000	€
Kapital	115 537	€
Palgakulu	3 650	€
Remondi/hoolduskulu	18 053	€
Aastane kogukulu	239 180	€
Metaani saagis	386 836	Nm ³
Metaani (puhastamata) Nm ³		
hind	0,62	€
Biometaani hind	0,82	€
CBG hind	1,15	€

Tabel 7. Biometaani ning surubiometaani omahind suurema veisefarmi puhul.

Läga 20 000t, silo 3 000t	Väärtus	Ühik
Biogaasijaama maksumus	1 121 630	€
Võrguühendus	15 000	
Silo tegemise tehnika ja ehitised	0	€
Investeering kokku	1 136 630	€
Elekter	16 560	€
Soojus	39 184	€
Silo	75 000	€
Kapital	181 861	€
Palgakulu	5 475	€
Remondi/hoolduskulu	28 416	€
Aastane kogukulu	346 496	€
Metaani saagis	669 160	Nm ³
Metaani (puhastamata) Nm ³ hind	0,52	€
Biometaani hind	0,70	€
CBG hind	0,98	€

Lisaks põhistsenaariumitele arvutati välja hinna muutused silo maksumuse muutumisel, puhastustehnoloogia maksumuse muutumisel ja juhul kui investeeringut toetatakse mingis osas (Tabel 10). Tegelikult mõjutab investeeringutoetus, läbi puhastussüsteemi maksumuse, ka puhastamise hinda, kuid seda on antud töös võimalik hinnata hüpoteetiliselt.

Tabel 8. Biometaani omahinna muutumine erinevate eelduste mõjul.

Stsenaariumid	11 000t/2 000t CBG maksumus (€/kg)	20 000t/3 000t CBG maksumus (€/kg)
Esialgne maksumus	1,15	0,98
Investeeringutoetus 20%	1,06(-0,09)	0,93(-0,05)
Investeeringutoetus 40%	0,98(-0,17)	0,85(-0,13)
Silo hind 25€/t	1,07(-0,08)	-
Puhastamine 0,1€/m ³	0,93(-0,12)	0,87(-0,11)

Mõlema teoreetilise biogaasijaama puhul koostati ka kombineeritud variant, kus silo hinnaks arvestati 25€/t, investeeringutoetuseks 40%, omaosduseks 20% ning puhastamise

maksumuseks 0,1€/Nm³. Sellisel juhul tuli surubiometaan omahinnaks väiksemas farmis 0,77€/kg ja suuremas farmis 0,70€/kg.

5.3 Biometaan omahinda mõjutavate tegurite analüüs

Kahe farmi omahinna arvutusi analüüsidest selgus, et ühe kg CBG(surubiometaan) tootmise hinna vahe oli suurema farmi kasuks peamiselt silo hinna, mastaabiefekti ning kõrgema kuivainesisalduse tõttu lägas. Väiksema farmi puhul tasakaalustas seisu asjaolu, et oli võimalik kasutada suuremat silo osakaalu ning seega tõsta metaani saagikust.

Mõlema farmi puhul oli ülekaalukalt suurimaks aastaseks kuluks investeeringu jaoks võetud laenu tasumine. Seetõttu oli 40% investeeringutoetuse mõju CBG omahinnale ka kõige suurem ja langetas väiksema farmi puhul tootmise hinda 0,17€ võrra ja suure farmi puhul 0,13€ võrra. Mõjult järgmisena tuli puhastushinna lükkamine 0,2 eurot 0,1 euronni kuupmeetri biometaan kohta, mille aluseks võeti membraantehnoloogia areng ning see läbi puhastamise hinna potentsiaalne langustrend [52]. 0,1 eurose puhastusmaksumuse juures muutus surubiometaan 0,12€ võrra odavamaks väiksema jaama puhul ja 0,11€ võrra odavamaks suure jaama näitel. Juhul kui väiksemas jaamas oleks võimalik teha silo hoidlatesse ja seetõttu oleks hind alanenud 25€ peale tonni kohta, siis largeks hind 0,08€ võrra.

Sellest võib järeldada, et väga tähtis on Eesti olusid ning uurimisaluste farmide mahte arvestades, biogaasijaamale antava toetuse suurus ja puhastustehnoloogia lahendus. Toetuse puudumine ning kalli puhastustehnoloogia kasutamine viib hind biometaan omahinna kõrgeks ja seeläbi vähendab majanduslikust aspektist motivatsiooni biogaasijaama rajada. Üheks tähtsaks majanduslikku tasuvust mõjutavaks teguriks on olemasoleva ja efektiivse silo tegemise võimaluse olemasolu. Juhul kui silo on vaja osta või kogu silo tegemiseks vajalik tehnika osta ning taristu rajada, siis võib see biogaasi tootmise omahinna väga kõrgeks ajada.

Kombineeritud variandi puhul saadud maksumus 0,77€/kg ja 0,70€/kg on juba suhteliselt lähedal surumaagaasi hinnale tanklas, milleks on 0,6232€/kg ilma käibemaksuta. Sellest hoolimata oleks magistratöös käsitletud veisefarmide puhul lisaks investeeringutoetusele vajalik ka otsetoetus m³ või kg kohta, sest surubiometaan CNG hinnaga müües ei oleks biogaasijaama rajamine ning biometaan tootmine neis farmides majanduslikult motiveeritud.

Kokkuvõte

Fossiilsete kütuste tarbimise piiramiseks ja keskkonnasäästlikust põhimõttest lähtuvalt on Euroopa Liidus vastu võetud taastuvenergia direktiiv (TED) 2009/28/EÜ. Eesti võetud kohustus selles on 2020. aastaks tagada, et 10% kogu tarbitavatest transpordikütustest oleks taastuvatest allikatest. Üheks variandiks selles täitmisel on biogaasi kasutamine fossiilsete vedelkütuste asemel transpordis. Ka Eesti Valitsus on avaldanud oma toetust biometaani kasutamisele transpordis ja selleks plaanitakse kasutada rahalisi vahendeid saastekvoodi oksjonitelt saadud tuludest.

Et saada ülevaade, kui suures osas võiks biogaas Eestis asendada vedelkütuseid, tuleks võimalikult täpselt hinnata biogaasi potentsiaali. Antud töö raames arvutati Eesti biogaasi potentsiaal enamlevinud meetodikat aluseks. Selle tulemusena leiti, et Eesti reaalselt kasutatava biogaasist toodetud biometaani hulk võiks olla 219,6 mln Nm³. Samas ilmnesid uurimistöö käigus erinevat laadi kitsendused biogaasi tootmisel, mille arvestamisel ei saa praeguse meetodika alusel hinnatud potentsiaali piisavalt täpselt lugeda. Sellest tingituna pakuti välja uus meetodika, mille kasutamisel saadi biogaasis sisalduva biometaani potentsiaaliks 123,2 mln Nm³. Vahe tuli peamiselt biogaasi põllumajanduslike toorainete käsitlemist. Vanema meetodika puhul käsitleti rohtset biomassi põllumajanduslikelt maadelt, poollooduslikelt maadelt ja kasutamata põllumaadelt ning loomade sõnnikut üksteisest sõltumatute biogaasi potentsiaalidena. Uue meetodika puhul hinnati sõnniku ja rohtse biomassi kooskääritamise majanduslikke ja keskkonnaaspekte piisavalt tähtsaks, et käsitleda neid ühtse ja üksteisest sõltuva potentsiaalina. Kui reaalselt kasutusele võtta pool 123,2 mln Nm³ biometaani potentsiaalist, siis tähendaks see 64,7 ktoe bensiini asendamist, mis täidaks umbes 2/3 taastuvenergia direktiivis sätestatud kohustusest.

Selleks, et kogu biogaasis sisalduva metaani potentsiaali transpordis ära kasutada, tuleb biogaasijaamas toodetud ning umbes 55% metaani sisaldusega erinevate gaaside segu ehk biogaasi puhastada biometaaniks. Biogaasi puhastamiseks on mitmeid erinevaid tehnoloogilisi lahendusi, kuigi valiku tegemine võib osutuda üsna keeruliseks. Üheks töö eesmärgiks oli tehnoloogiate võrdlus kirjandusallikate põhjal ning Eesti oludes parima võimaliku puhastustehnoloogia välja selgitamine. Vaid kirjanduslike allikate põhjal on siiski väga keeruline ühte-kahte puhastusmeetodit teiste seast esile tuua, sest nende efektiivsus ja hind sõltub väga palju konkreetsest projektist ning tehnoloogiat tarnivast ettevõttest. Lisaks

sellele ei avaldata erinevatel põhjustel väga detailseid andmeid juba töös olevate puhastussüsteemide kohta, mis raskendab erinevate puhastusmeetodite täpsemat omavahelist võrdlemist. Esmajärjekorras võiks siiski kaaluda veega rõhu all puhastamist ja membraantehnoloogiat, mille puhul on hinnanguline biometaaniks puhastamise maksumus 0,1-0,2 €/Nm³, mille puhul on surubiometaanide tootmine ja kasutamine reaalne võimalus transpordisektorit loodussäästlikumaks muuta.

Väga tähtis tegur biogaasisektori arenemisel ongi biogaasi ja biometaanide tootmise majanduslik jätkusuutlikkus, mille üheks tähtsaks mõjutajaks puhastamise maksumus on. Kuid see ei ole ainuke tegur ning biometaanide tootmise majandusliku terviksisüsteemi uurimiseks koostati tasuvusanalüüs kahe reaalse Eesti veisefarmi näitel. Mõlema farmi omanikku intervjueriti ning koguti nende käest tasuvusanalüüsiks vajalikud andmed. Kombineerides seda informatsiooni kirjanduslike andmetega koostati metoodika, mille alusel arvutati mõlema farmi jaoks surubiometaanide (CBG) tootmise omahind. Väiksema farmi (700 looma) puhul tuli kilogrammi CBG hinnaks 1,15 € ja suurema farmi (1000 looma) võimalusi ning reaalsel olukorda arvestades tuli omahinnaks 0,98 €/kg. Erinevate tegurite mõju analüüsid selgus, et suurimateks omahinda mõjutavateks teguriteks on investeeringu suurus ning biometaaniks puhastamise maksumus. Oluline on ka kooskääritamiseks kasutatava silo omahind. Mõlema farmi puhul koostati ka niiöelda ideaalstsenaarium, mille puhul tehti tasuvusarvutused 40% investeeringutoetuse, 20% omafinantseeringu, silo hinna 25 €/t ja puhastusmaksumuse 0,1€/Nm³ juures. Sellisel juhul tuli CBG maksumuseks väiksemas farmis 0,77 €/kg ja 0,70 €/kg suuremas, mis on juba võrreldav Eesti müüdava surumaagaasi (CNG) hinnale, milleks on 0,6232€/kg. Kuid ka 40% investeeringu toetuse puhul vajaksid mõlemad biogaasijaamad majanduslikku lisaabi näiteks otsetoetuste näol.

Kõige tähtsamaks keskkonnamõjuna CBG kasutamisel transpordis on kasvuhoonegaaside vähenemine, mis on tingitud fossiilsete kütuste asendamisest sellega. Seda on hea arväärtusena hinnata ja võrrelda, mistõttu on see ka peamine indikaator TEDis. Probleemne on aga TEDi enda metoodikat kasutades tõestada, konkreetsetel oludel toodetud, biometaanide säästlikkuse kriteeriumile vastavus. Selle probleemi leevendamiseks tuleks Eestis väga selgelt defineerida kääritusjääk biogaasi tootmise kaassaadusena.

Biometaanide tootmiseks vajaliku rahalise abi otstarbekust ei tohiks mõõta vaid direktiivide täitmise ning energeetilise saagise aspektist vaid arvesse tuleks võtta kogu mõju, mida biogaasi tootmine ning biometaanide kasutamine transpordis avaldab. Positiivsete

lisaväärtustena toob see kaasa näiteks mineraalsete väetiste asendamise võimaluse, läga haisu probleemi lahendamise, umbrohu leviku piiramise, rohumaa parendamise motivatsiooni tõusmise ja maapiirkondadesse tootmisettevõtete lisandumise.

Arvestades Eesti biogaasi potentsiaali ning lähtudes aktuaalsetest andmetest biogaasi tootmise ning puhastamise kohta, võib järeldada, et Eestis on võimalik biometaanit arvestataval määral transpordisektori keskkonnasäästlikumaks muutmise eesmärgil toota, kuid selleks on vaja ulatuslikku riiklikku abi ja tugisüsteemi. Toetuste planeerimisel peaks siiski arvestama, et toetuste positiivne mõju ulatub transpordisektorist kaugemale.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Antti Rooset, kes mind selle põneva teemaga kokku viis ja aitas lõpptulemuseni jõuda.

Väga suureks abiks oma kogemuste ja teadmistega olid Ahto Oja ja Tauno Trink.

Soovin anonüümselt tänada veel kahte põllumajandusettevõtjat, kes leidsid aega, et anda põhjalik intervjuu ja ülevaade oma farmi ärimudelist, tööprotsessidest ja tehnoloogiatest biogaasi tootmise kontekstis.

Kasutatud kirjandus

1. World Energy Council. 2011. Global Transport Scenarios 2050. Kättesaadav: http://www.worldenergy.org/documents/wec_transport_scenarios_2050.pdf (15.05.2013)
2. BP. Statistical Review of World Energy. (2011). Kättesaadav: http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf (10.05.2013)
3. Oja, A. 2011. Ülevaade metaankütuste kasutamise kogemustest transpordis Rootsis, Saksamaal, Austrias ja Itaalias. Kättesaadav: http://www.monusminek.ee/documents/EAS_metaankytused_4ELriigis_oja_141011.pdf (11.05.2013)
4. Keskkonnaministeerium. 2013. Biogaasi investeeringud võivad saada osa kvoodioksjoni tulus. Pressiteade. Kättesaadav: <http://www.envir.ee/1198184> (16.05.2013)
5. Budzianowski, W., 2012. Sustainable biogas energy in Poland: Prospects and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 342-349
6. Ryckebosch, E., Drouillon, M., Vervaeren, H. 2011. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy 35: 1633-1645
7. Luna del Risco, M. 2011. Eesti substraadi biokeemilise metaanitootlikkuse potentsiaali määramine ja anaeroobse kääritamise mõnede inhibiitorite uurimine. Doktoritöö. Eesti Maaülikool.
8. Niitaru, P. 2012. Biometaani kasutamine transpordikütusena ning selle peamiste takistuste ülevaade. Lõputöö. Tallinna Tehnikakõrgkool. Arhitektuuri ka keskkonnatehnika teaduskond.
9. Wu, Y., He., J. 2013. Characterization of anaerobic consortia coupled lignin depolymerization with biomethane generation. Biorecourse Technology. 139: 5-12
10. Monteil-Rivera, F., Phuong, M., Ye, M., Halasz, A., Hawari, J. 2013. Isolation and characterization of herbaceous lignins for applications in biomaterials. Industrial Crops and Products 41: 364-364

11. Beylot, A., Villeneuve, J., Bellenfant, G., 2013. Life Cycle Assessment of landfill biogas management: Sensitivity to diffuse and combustion air emissions. Waste Management 33: 401-411
12. Bond, T., Tempelton, M. 2011. History and future of domestic biogas plants in the developing world. Energy for Sustainable Development. 15: 347-354
13. Jiang, Z., Sommer, S., Christensen., K. 2011. A review of the biogas industry in China. Energy Policy. 39: 6073-6081
14. Trink, T. 2010. Biogaasi tootmise otstarbekus tänastes Eesti oludes. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool. Tartu Kolledž.
15. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. 2011. Eesti Vabariigi aruanne Euroopa Komisjonile taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise ja edendamise edusammude kohta. Kättesaadav: http://www.mkm.ee/public/111230_EV_taastuvenergia_tegevuskava_vahearuanne.docx
16. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2009/28/EÜ Kättesaadav: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:et:PDF> (16.05.2013)
17. Maanteeamet. Sõlmiti leping keskkonnasõbralike busside ostuks. Kättesaadav: <http://www.mnt.ee/?id=21823> (14.05.2013)
18. U.S Energy Information Administration. Kodulehekülg. Kättesaadav: <http://www.eia.gov/naturalgas/> (15.05.2013)
19. Kask, Ü. 2012. Biometaan mootorikütusena. Eesti Põlevloodusvarad ja –jäätmel. 1-2: 17-19
20. OÜ Gaznet. Gaasiseadmete ülevaade. Kättesaadav: <http://www.gaznet.ee/autogaasiseadmetest/> (14.05.2013)
21. Natural and bio Gas Vehicle Association. Ülemaailmne maagaasisõidukite statistika. Kättesaadav: <http://www.ngvaeurope.eu/worldwide-ngv-statistics> (17.05.2013)
22. AS Eesti Gaas. Surugaasi kodulehekülg. Kättesaadav: <http://cng.gaas.ee/et/animatsioon> (13.05.2013)
23. Vaker, V. 2011. Surugaasi tankimise tehnoloogiad. Ettekanne. Tartu. Kättesaadav: www.tartu.ee/data/EESTI%20GAAS.pptx (16.05.2013)

24. Bordelanne, O., Montero, M., Bravin, F., Prieur-Vernat, A., Oliveti-Selmi, O., Pierre H., Papadopoulou M., Muller, T. 2011. Biomethane CNG hybrid: A reduction by more than 80% of the greenhouse gases emissions compared to gasoline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 3: 617-624
25. Uusitalo, R., Soukka R., Horttanainen, A., Niskanen, A., Havukainen, J. 2013. Economics and greenhouse gas balance of biogas use systems in the Finnish transportation sector. *Renewable Energy* 51: 132-140
26. Shindell, D. T., Faluvegi, G., Koch, D. M., Schmidt, G. A., Unger, N., Bauer, S. E. 2009. Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. *Science*. 30: 716–718
27. Börjesson, M., Ahlgren E. 2012. Cost-effective biogas utilisation - A modelling assessment of gas infrastructure options in a regional energy system. *Energy* 48: 212-226
28. Manninen, K., Koskela, S., Nuppenen, A., Sorvari, J., Nevalainen, O., Siitonen, S. 2013. The applicability of the renewable energy directive calculation to assess the sustainability of biogas production. *Energy Policy*. 56: 549-557
29. Adelt, M., Wolf D., Vogel, A. 2011. LCA of biomethane. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 3: 646-650
30. Normak, A., Volmer, E., Orupõld, K., Kask, Ü. 2009. Biogaasi tootmine ja kasutamine. Käsiraamat. Kättesaadav: http://tek.emu.ee/userfiles/taastuvenergia_keskus/biogaasiraamat_veebiversioon.pdf (12.05.2013)
31. Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A., Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare. *Biorenewable technology*. 100: 2952 - 2958
32. TNS Emor. 2011. Agriseire. Kättesaadav: http://www.emor.ee/public/documents/agriseire/Lihaturg_2011.pdf
33. Heinsoo, K., Melts, I., Sammul, M., Holm, B. 2010. The potential of Estonian seminatural grasslands for bioenergy production. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 137: 86-92
34. Mõnus Minek Sustainable Energy & Environment Solutions. 2011. National report on current status of biogas production – the republic of Estonia. Kättesaadav: <http://www.gashighway.net/GetItem.asp?item=digistorefile;144379;1197¶ms=open;gallery> (12.05.2013)

35. Carescana, F., Comodi, G., Pelagalli, L., Pierpaoli, P., Vagni, S. 2011 Energy production from landfill biogas: An italian case. *Biomass and Energy*. 35: 4331-4339
36. Vares, V. 2008. Biomassi tehnoloogiauuringud ja tehnoloogiate rakendamine Eestis. Kättesaadav: http://www.bioenergybaltic.ee/bw_client_files/bioenergybaltic/public/img/File/Lep7028VVFinalB.pdf (13.05.2013)
37. Oja, A. 2011. Särevere Biogaasi Energiaühistu (SäBE) loomise eelteostatavuse uuring aruanne. Kättesaadav: <http://www.monusminek.ee/documents/KENA-S%C3%A4revere-aruanne.pdf> (12.05.2013)
38. Jahilo, S. 2011. Tartumaa rohusilo ja sõnniku biogaasipotentsiaali primaarenergeetilise olelusringi- ja ressursside ruumianalüüsi meetodika arendamine. Magistritöö. Tartu Ülikool. Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
39. Läänemere regiooni SPIN projekt. 2011. Eesti biogaasisektori ülevaade: hetkeseis ja arenguvajadused. Kättesaadav: http://www.lote.ut.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1110030/Eesti+biogaasisektori+%FClevaade_hetkeseis+ja+arenguvajadused.pdf (16.05.2013)
40. MTT raport 54. 2012. Biogaasi tootmise ja kasutamise pilootuuring Harjumaal. Kättesaadav: <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti54.pdf>
41. Eesti Taastuvenergia Koda. 2013. Biogaas kui oluline taastuvenergia allikas Eestis. Ettekanne. Kättesaadav: http://eestibiogaas.ee/wp-content/uploads/2013/04/biogaas-kui-oluline-TE-allikas-Eestis_Tammist_09.04.131.pdf
42. Roose, A., Reinsoo, K., Oja, A., Varžinskas, V. 2012. Underdog or bulldog: introducing biogas technologies in Estonia. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 14: 1085-1093
43. Yangin-Gomec, C., Ozturk, I. 2013. Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic co-digestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition. *Energy Conversion and Management*. 71: 92-100
44. Wang, X., Yang, G., Li, F., Feng, Y., Ren, G., Han, X. 2013. Evaluation of two statistical methods for optimizing the feeding composition in anaerobic co-digestion: Mixture design and central composite design. *Bioresource Technology*. 131: 172-178

45. Wikipedia. Heat of combustion. Kättesaadav:
http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_of_combustion (14.05.2013)
46. Power, N., Murphy, J. 2009. Which is the preferable transport fuel on a greenhouse gas basis; biomethane or ethanol? *Biomass and Energy*. 33: 1409-1412
47. Wikipedia. Tonne of oil equivalent. Kättesaadav:
http://en.wikipedia.org/wiki/Tonne_of_oil_equivalent (15.05.2013)
48. Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R., Guwy. 2011. An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy*. 39: 1806-1816
49. Läntelä, J., Rasi, S., Lehtinen, J., Rintala, J. 2012. Landfill gas upgrading with pilot-scale water scrubber: Performance assessment with adsorption water recycling. *Applied Energy*. 92: 307-314
50. Brown, J., Nizami, A., Thamsirirot, T., Murphy, J. 2011. Assessing the cost of biofuel production with increasing penetration of the transport fuel market: A case study of gaseous biomethane in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:4537-4547
51. Scholz, M., Melin, T., Wessling, M. 2013. Transforming biogas into biomethane using membrane technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 17: 199-212
52. Shao, P., Dal-Cin, M., Kumar, A., Li, H., Singh, D. 2012. Design and economics of hybrid membrane-temperature swing adsorption process for upgrading biogas. *Journal of Membrane Science*. 413-414: 17-28
53. Eesti Statistika. Kättesaadav:
<http://www.stat.ee>
54. The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden – A comparison of different CHP technologies. *Applied Energy*. 98: 502-511
55. Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R., Guwy. 2011. An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK. *Energy Policy*. 39: 1806-1816
56. Nizami, A., Murphy J. 2010. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and sustainable Energy reviews* 14: 1558-1568
57. AS Pelletiküte. Kodulehekülg. Kättesaadav:
<http://www.pellet.ee/> (14.05.2013)

58. Linke, B., Muha, I., Wittum, G., Plogsties, V. 2013. Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale German biogas plants: A model for calculating the effect of hydraulic retention time and VS crop proportions in the mixture on methane yield from digester storage at different temperatures. *Biorecourse Technology*. 130: 689-695

Analysis of economical, technological and environmental aspects of using biogas as transportfuel

Martin Ruul

Summary

Biogas is a mixture of gases that is produced from anaerobic digestion and consists primarily of CH₄ (40-75%) and CO₂ (20-45%). Trace components that are often present in biogas are water vapor (5-10%), hydrogen sulfide (0,005-2%), siloxanes, hydrocarbons, ammonia, oxygen carbon monoxide and nitrogen. When biogas is upgraded to natural gas quality it is called biomethane and can be used just as natural gas, for example in CNG vehicles.

At the moment there is no biomethane production or usage in Estonia, but just recently Estonian government announced the upcoming financial support for producing and using biomethane as transportfuel to meet the requirements of Renewable Energy Directive 2009/28/EC (RED). Estonia is required to have at least 10% of the total energy consumed in transportation sector to be from renewable sources by year 2020.

The aim of this paper was to evaluate the biogas potential of Estonia, analyze the environmental, social aspects of producing and using biomethane, compare different biogas upgrading technologies and to evaluate cost-effectiveness of biomethane production in real life conditions by using examples of two cattle farms. The hypotheses were that the Estonian biogas potential is big enough to justify the financial aid that is needed to develop this sector, that there are many positive economical and social benefits associated with biomethane production and its financially viable due to efficiency and development of biomethane upgrading technologies.

During the research for the paper and in process of evaluating Estonian biogas potential, some restrictions were presented, that imposed the need to critically assess the current and most common methodology of evaluating biogas potential in Estonia. In this degree work a different approach was chosen. Because of economical and environmental reasons it was assumed that grass silage from agricultural lands, unused agricultural lands and semi-natural grasslands can't be used as a single input for biogas production and co-digestion with manure

is preferred. With this kind of methodology silage from different sources and manure was considered as one agricultural potential and the potential of 123,2 mln Nm³ for Estonian methane from renewable sources was estimated. That is considerably lower than 219,6 mln Nm³ CH₄, which is the prediction from using the older method, but even then it could fulfil the needed 90-100 ktoe energy needed to achieve the 10% renewable source requirement stated in the RED.

Environmental and social benefits were discussed in detail. The most substantial environmental aspect is the reduction of greenhouse gases emission with substituting fossil fuels with biomethane. This is the aspect that the Renewable Energy Directive most emphasizes. To fulfil the 10% clause for transport fuel, it is needed that the renewable fuels used for that are meeting the sustainability criteria, established in the same directive. By 2018, all biofuels should decrease the greenhouse emissions by 60% when substituting fossil fuels. There are some confusion and problems with assessing the reduction using the RED methodology and to ease that, it is proposed in the paper that Estonia should distinctly classify digestate as co-product of biogas production, not a residue. Apart from greenhouse gas emissions reduction, there are more positive aspects of biogas production, like replacing mineral fertilizers with digestate, resolving smell problems originating from manure, restricting weeds spreading, increasing the motivation to mend agricultural lands and expanding production in rural areas. These effects should all be considered when assessing the benefits of biomethane usage as transport fuel.

Very important stage of biogas usage in transport, is the biogas upgrading process to biomethane. This is one of the key factors affecting the financial viability of the process. Most common upgrading techniques were discussed and compared in this paper to propose the best one. This turned out to be a very difficult task, because there is very little detailed information about real-life upgrading processes. This might be because of the unwillingness to share information concerning confidential economical aspects of biogas operators and technology providers. Despite that two technologies are highlighted with the most promise in Estonian conditions: high pressure water scrubbing and membrane separation. The expected cost of upgrading one Nm³ biomethane with these, is 0,1€ to 0,2€.

Finally using these upgrading cost values, data from literature and information from two farm owners a methodology was developed and cost-benefit analysis were made for two cattle farms, sized 700(small farm) and 1000(big farm) cows. In basic scenarios the predicted

production costs of compressed biomethane (CBG) were 1,15€/kg for small farm and 0,98€/kg for big farm. It was determined that the most influence concerning production costs were the investment costs, upgrading costs and silage costs. An ideal scenarios witch assumed 40% investment support, 20% own finance, upgrading costs 0,1€/Nm³ for biomethane were composed for both farms. In that case the production price for CBG declined to 0,77€/kg for small farm and to 0,70€ for big farm. These prices are not very far from compressed natural gas price in Estonia, witch is 0,6232 without VAT. Still somekind of direct subsidiaries are needed, in addition to the 40% investment support, to make biomethane production financially attractive in these two farms.

Considering the Estonian biogas potential, various positive environmental, social and economical effects of biomethane production and usage as transportation fuel and the current state of upgrading technologies, it is worth to consider giving biogas sector the needed financial support.

Lisad

Lisa 1. Väiksema veisefarmi biometaanii omahinna arvutamisel kasutatud parameetrid.

Parameetrid 11 000t/2 000t	Väärtus	Ühik
Läga kogus	11 000	t
Silo kogus	2 200	t
Silo ja läga kokku	13 200	t
Sõnniku KA sisaldus	7,8	%
Silo KA sisaldus	31,4	%
Segu KA osakaal	11,7	%
Soovitatav KA osakaal segus	11,7	%
Segu mass antud KA % juures	13 238	t
oKA osakaal sõnniku märgmassis	6,1	%
oKA osakaal silo märgmassis	29,1	%
Kokku oKA	1 311	t
Silo oKA osakaal kogu oKA	49	%
Metaani saagis selle osakaalu juures	320	m ³ /t*LOA
Protsessi temperatuur	35	°C
Eesti keskmine aastane temp.	5	°C
Laenu intress	6	%
Soojuse hind	31	€/MWh
Elektri kulu tonni tooraine kohta	5	kWh/t
Elektri hind	0,12	€/kWh
Rohu/silo hind	35	€/t
Investeering m ³ kääriti kohta	400	€/m ³
Päevi aastas	365	d
Biogaasi puhastamine	0,20	€/m ³
Töötunnid	730	h
Tööjõu hind	5	€/h
Viibeaeg kääritis	45	d
Kääriti orgaaniline koormus	2,00	kgLOA/m ³ *d
Metaani kadu puhastamisel	2	%
Päevane sisestatav kogus	36,3	t
Segu energiamahutavus	1,16	kWh/K*t
Energia substraadi soojendamiseks	576	MWh
Kääriti ruumala	1 795	m ³
Kääriti raadius	6,59	m ²
Kääriti pindala	818	m ²
U-väärtus	0,19	W/m ² *K
Soojuskadu külmasildadega	56	MWh
Kütte kasutegur	80	%
Vajalik soojusenergia kokku	632	MWh

Lisa 2. Suurema veisefarmi biometaanini omahinna arvutamisel kasutatud parameetrid.

Parameetrid 20 000t/3 000t	Väärtus	Ühik
Läga kogus	20 000	t
Silo kogus	3 000	t
Silo ja läga kokku	23 000	t
Sõnniku KA sisaldus	8,5	%
Silo KA sisaldus	31,4	%
Segu KA osakaal	11,5	%
Soovitav KA osakaal segus	11,5	%
Segu mass antud KA % juures	22 974	t
oKA osakaal sõnniku märgmassis	6,6	%
oKA osakaal silo märgmassis	29,1	%
Kokku oKA	2 203	t
Silo oKA osakaal kogu oKA	40	%
Metaani saagis selle osakaalu juures	310	m ³ /t*oKA
Protsessi temperatuur	35	°C
Eesti keskmine aastane temp.	5	°C
Laenu intress	6	%
Soojuse hind	31	€/MWh
Elektri kulu tonni tooraine kohta	5	kWh/t
Elektri hind	0,12	€/kWh
Rohu/silo hind	25	€/t
Investeering m ³ kääriti kohta	400	€/m ³
Päevi aastas	365	d
Biogaasi puhastamine	0,20	€/m ³
Töötunnid	1 095	h
Tööjõu hind	5	€/h
Viibeaeg kääritis	45	d
Kääriti orgaaniline koormus	1,94	kg oKA/m ³ *d
Metaani kadu puhastamisel	2	%
Päevane sisestatav kogus	62,9	t
Segu energiamahutavus	1,16	kWh/K*t
Energia substraadi soojendamiseks	999	MWh
Kääriti ruumala	3 116	m ³
Kääriti raadius	7,92	m ²
Kääriti pindala	1 181	m ²
U-väärtus	0,19	W/m ² *K
Soojuskadu külmasildadega	81	MWh
Kütte kasutegur	80	%
Vajalik soojusenergia kokku	1 080	MWh

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Martin Ruul (sünnikuupäev: 06.10.1986)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose: „Biogaasi transpordikütusena kasutamise majanduslike, tehnoloogiliste ja keskkonnaaspektide analüüs“, mille juhendaja on Antti Roose.
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus **20.05.2013**